



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

**STUDIUM ALKALICKO-KŘEMIČITÉ REAKCE
V CEMENTOBETONOVÝCH KRYTECH**

THE STUDY OF ALKALI-SILICA REACTION IN THE CEMENT-CONCRETE SHELTERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Lázníčka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Josef Lázníčka
Název	Studium alkalicko-křemičité reakce v cementobetonových krytech
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Odborné zahraniční i tuzemské časopisy, sborníky z odborných symposií a konferencí, internetové zdroje odborných publikací z daného oboru, technické předpisy ŘSD ČR
Diplomové práce vypracované na ÚTHD FAST Brno v období 2009 – 2016

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Alkalicko – křemičitá reakce (ASR) kameniv v cementových kompozitech je dlouhá léta diskutovaný problém ovlivňující životnost betonových konstrukcí. Nejvýznamněji se tento negativní jev projevuje u cemento-betonových krytů vozovek. V současné době se v ČR vyskytují názory, že tímto problémem způsobujícím postupný rozpad povrchů dálnic je zasaženo více jako 70% všech betonových vozovek v ČR.

Cílem vaší práce bude souhrnná rešerže zkušeností z této problematiky zejména z odborné literatury z USA a Německa. Popište mechanismy vzniku, vlivy různých typů cementů a příměsí do betonu. Dále charakterizujte kameniva, která jsou nejvíce ohrožena, včetně velikostí částic reaktivního SiO₂ a případné rychlosti reakce v závislosti na obsahu alkálií v cementu.

Porovnejte metodiky testování náchylnosti kameniv podle ČSN, ASTM a DIN, případně předpisů příslušných resortů dopravy. Vymezte mezní podmínky pro vznik ASR.

V praktické části na vzorcích betonu odebraných z různých úseků dálnic v ČR ověřte experimentálními laboratorními metodami, zda tato reakce probíhá, případně v jaké fázi se nachází. Z dostupných zdrojů posuďte použité typy kameniv v těchto betonech a dobu exploatace v provozu dálnic a rozsah destrukce vlivem ASR.

Rozsah práce min. 40 stran

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).

2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Alkalicko – křemičitá reakce je problémem trvanlivosti betonu vedoucí k významným nákladům na rekonstrukci a údržbu betonových infrastruktur. Cílem práce je shrnutí současného stavu porozumění této reakce s ohledem na reakční mechanismy. Praktická část se zabývá poruchami cemento – betonových krytů vozovek na úsecích dálnic v České republice. Cílem bylo zjistit, zda porušení betonu vzniklo vlivem alkalicko – křemičité reakce nebo jiným mechanismem.

KLÍČOVÁ SLOVA

alkalicko – křemičitá reakce, cemento – betonový kryt, reakční mechanismy, reaktivní kamenivo, trvanlivost betonu, pórový roztok, alkalicko – křemičitý gel

ABSTRACT

Alkali – silica reaction is concrete durability problem resulting in significant maintenance and reconstruction costs to concrete infrastructures. This paper intends to summarize the current state of understanding this reaction with respect to reaction mechanisms. The experimental part of this paper deals with deterioration observed in cement – concrete cover for sections of highways in the Czech Republic. The objective was to determine whether concrete failure arose due to alkali – silica reaction or other mechanism.

KEYWORDS

alkali – silica reaction, cement – concrete cover, reaction mechanisms, reactive aggregate, durability of concrete, pore solution, alkali – silica gel

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Josef Lázníčka *Studium alkalicko-křemičité reakce v cementobetonových krytech*. Brno, 2017. 56 s., 41 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 6. 2. 2017

Josef Láznička
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Srdečně děkuji svému vedoucímu prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. za odborný dohled při zpracování mé bakalářské práce, za poskytnutí literatury a za cenné rady.

.

OBSAH

I.	Teoretická část.....	10
1	Úvod.....	10
2	Historické pozadí.....	11
3	Projevy ASR.....	11
4	Faktory ovlivňující reakci	13
4.1	Obsah alkálií v cementu	13
4.2	Vlhkost	14
5	Reakční mechanismy.....	14
5.1	Rozpouštění metastabilního SiO_2	16
5.2	Tvorba a gelace koloidního SiO_2	18
5.3	Bobtnání gelu	19
6	Vliv vlastností kameniva na ASR	19
6.1	Složení a mineralogie kameniva	20
6.2	Rozměr kameniva.....	21
6.3	Reakce na povrchu a uvnitř, rychlost reakce.....	21
7	Zkoušky pro hodnocení ASR ve ztvrdlém betonu	22
7.1	Uranylacetátová metoda.....	22
7.2	Rhodaminová metoda.....	23
7.3	Hexanitrokobaltitanová metoda	23

7.4	Důkaz ASR mikroskopicky.....	23
8	Zmírnění ASR	24
9	Zkušenosti s ASR v německu	26
9.1	Současný stav	26
9.2	Hodnocení kameniva.....	27
9.2.1	Urychlená zkouška rozpínání maltových trámečků.....	27
9.2.2	Výsledky	29
9.2.3	Zkoušky betonových trámů.....	29
9.3	Strategie testování	30
10	Cementobetonové kryty	31
10.1	Rozdíly mezi cementobetonovým a asfaltovým krytem vozovek	31
10.1.1	Rozdíly z hlediska správce	32
10.1.2	Rozdíly z hlediska uživatele	32
11	Vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací – TP 137	34
11.1	Kamenivo do betonu.....	34
11.1.1	Vyloučené petrografické typy hornin	34
11.2	Požadavky na složení betonu.....	35
II.	Praktická část.....	37
12	Cíl.....	37
13	Použité materiály.....	37
13.1	Vzorky betonu.....	37
13.2	Chemické látky	40

13.2.1	Hexanitrokobaltitan sodný	40
13.2.2	Rhodamin B	40
14	Metodika zkoušení	40
14.1	Příprava vzorků.....	40
14.2	Příprava roztoků.....	42
14.3	Postupy zkoušek	42
14.3.1	Kolorimetrické zkoušky.....	42
14.3.2	Mikroskopický důkaz ASR.....	43
15	Výsledky.....	44
15.1	Kolorimetrické zkoušky.....	44
15.2	Mikroskopický důkaz ASR.....	45
16	Závěr.....	49
17	Použitá literatura	50
18	Seznam příloh.....	54
18.1	Seznam tabulek.....	54
18.2	Seznam obrázků.....	54
18.3	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	56

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ÚVOD

Alkalicko-křemičitá reakce (ASR) je jedním z hlavních problémů trvanlivosti betonových konstrukcí, jenž má za následek zvýšené náklady na údržbu a rekonstrukci betonové infrastruktury po celém světě. I přes desetiletí výzkumu nejsou chemické a fyzikální reakční mechanismy zcela jasné, a to především na molekulární úrovni. Toto má za následek neschopnost předvídat životnost konstrukce a efektivně posoudit možnost vzniku ASR.[1]

ASR je škodlivá reakce mezi pórovým roztokem betonu a různými formami oxidu křemičitého obsaženého v mnoha přírodních či uměle vyráběných kamenivech do betonu. Struktura oxidu křemičitého je rozpuštěna nukleofilními OH- ionty a vysoce degradovaný oxid křemičitý se chová jako hygroskopický křemičitý gel. Bobtnání tohoto gelu vede k tvorbě napětí a případně vzniku trhlin v betonu. ASR je významným problémem z hlediska trvanlivosti betonu. ASR může poškozovat například betonové konstrukce mostů, vodohospodářské stavby nebo betonové prvky jaderných elektráren, a to může být velmi nebezpečné. Za posledních 70 let jsme se o ASR dozvěděli mnoho. Počínaje průkopnickou prací T. E. Stanton, který rozeznal význam alkálií v cementu a potřebu přítomnosti vody pro vznik reakce. Stanton také navrhl zkušební metodu pro testování reaktivity cementu a kameniva, z níž se později vyvinuly metody používané dnes. [1] [3]

Od roku 1940 byl výzkum primárně zaměřen na:

- a) pochopení reakčních mechanismů
- b) vytvoření spolehlivé a časově nenáročné zkušební metody pro identifikaci reaktivních minerálů a kameniv
- c) odhadu dlouhodobého chování betonu v konstrukci
- d) navrhování účinné metody pro omezení ASR v nových či stávajících konstrukcích

[1] [2]

2 HISTORICKÉ POZADÍ

Beton byl používán jako trvanlivý stavební materiál již od dob Římanů a betonové konstrukce římského původu můžeme spatřit v mnoha částech Evropy ještě dnes. Již v 19. století bylo zjištěno, že ačkoli je beton za normálních podmínek velice odolný materiál, tak při vystavení mrazu nebo působení mořské vody, dochází k zhoršování jeho stavu. Vyskytovaly se však případy porušení betonu, které nebylo možno přiřadit ani k jedné z těchto příčin a tak zůstaly nevysvětlené. Mezi lety 1920 a 1930 byly pozorovány na betonových konstrukcích v Kalifornii, USA, rozsáhlé trhliny, které vznikly během několika let od výstavby, ačkoli byly přijaty normy pro kontrolu stavebních materiálů a konstrukcí. V roce 1940 byl Stanton schopen demonstrovat existenci reakce alkalického kameniva, jako škodlivé reakce mezi složkami betonu. Brzy se ukázalo, že při poškození betonových konstrukcí pozorovaných v Kalifornii nebylo příliš důležité, jakým vnějším vlivům byla konstrukce vystavena, důležité byly vlastnosti použitého cementu a kameniva. Další Stantonovy experimentální studie ukázaly, že expanze a trhliny v betonu byly způsobeny použitím cementu s vysokým obsahem alkálií a kameniva s opálem. V roce 1941, krátce poté, co Stanton publikoval svoji práci, Blanks a Meissner popsali vznik trhlin a zhoršení vlastností betonu Parkerovy přehradě. Během následujících desetiletí byl prováděn výzkum ASR v mnoha laboratořích, nejprve v USA, později i v Evropě, Kanadě a v dalších částech světa. Další výzkum postupoval rychle a ubíral se několika různými směry, od identifikace minerálních složek podílejících se na reakci, přes mechanismy a kontrolu samotných reakcí, až k diagnostice, testování a hodnocení reakčních účinků. [3]

[4]

3 PROJEVY ASR

Projevy ASR, jež můžeme makroskopicky pozorovat na povrchu konstrukce, jsou zejména:

- a) trhliny s typickým tvarem uspořádání
- b) odprýskávání povrchu betonu
- c) posun konstrukčních prvků

- d) světlý povlak alkalicko křemičitého gelu na konstrukci
- e) drolení a celkový rozpad betonového dílce [5]



Obrázek 1: Závěrečné stadium rozpadu CB krytu dálnice D11 – rok 1998; trhliny typického tvaru vzniklé vlivem ASR [6]

Náhodně orientovaná síť trhlín na povrchu betonových prvků je klasickým příznakem ASR. V mnoha případech je expanze v jednom nebo více směrech omezena vlivem předpětí nebo vyztužení železobetonových konstrukcí. Nastane-li takový případ, expanze se vyskytuje ve směru nejmenšího odporu. K odprýskávání povrchu betonu dochází reakcí reaktivního kameniva, jež je v blízkosti povrchu. Probíhající expanzí dojde k odprýsknutí malty překrývající reagující kamenivo. Odprýskaná místa v podobě malých kónických kráterů se mohou objevovat i v důsledku působení mrazu, a to u betonů nasycených vodou nebo v případě, nachází-li se v blízkosti povrchu pórovité zrna kameniva. Obvykle je složité rozhodnout, co odprýsknutí způsobilo. [5]

Je třeba mít na paměti, že existuje mnoho příčin, jejichž důsledkem je vznik trhlín. Proto přítomnost jednoho nebo více uvedených projevů alkalicko-křemičité reakce nemusí nutně znamenat, že je reakce zodpovědná za pozorované poškození. Trhliny mohou vznikat

například v důsledku působení mrazu, koroze výztuže nebo vlivem teploty. Rozsah, v jakém ASR přispěla k celkovému poškození, lze jednoznačně určit na jádrových vývrtech, které se podrobí laboratorním zkouškám a petrografickému průzkumu. Na základě přítomnosti a rozsahu projevů ASR, lze podle tabulky určit pravděpodobnost výskytu reakce. [5]

Tabulka 1: Pravděpodobnost výskytu ASR na základě přítomnosti jejích projevů [5]

	pravděpodobnost přítomnosti ASR		
projev/vlastnost	nízká	střední	vysoká
expanze a/nebo posunutí prvků	žádná		
barevné změny povrchu	žádná	mírné zbarvení povrchu v okolí trhlin	mnoho trhlin s tmavým zbarvením, okolní beton světlý
výrony gelu	žádná	bílé nebo bezbarvé v okolí některých trhlin	bezbarvé, rosolovité výrony gelu spojené s řadou trhlin
trhliny	žádná	malý rozsah trhlin typického vzoru (map cracking)	rozsáhlá síť trhlin

4 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ REAKCI

4.1 OBSAH ALKÁLÍÍ V CEMENTU

Již v počátcích zkoumání ASR Stanton zjistil, že obsah alkálií, Na_2O a K_2O , v cementu má přímý vliv na sklon betonu k rozpínání. Pro stanovení obsahu alkalických oxidů v cementu slouží alkalický ekvivalent Na_2O_e . Je-li v betonu reaktivní kamenivo, uvádí se hodnota Na_2O_e v cementu 0,60 jako faktor zajišťující minimalizaci porušení betonu vlivem ASR. Vyskytly se však případy, kdy ani hodnota 0,60 a použití nízko alkalického cementu nezamezilo poškození betonu vlivem ASR. Proto Tuthill (1980) doporučil ještě nižší hodnotu Na_2O_e , a to 0,40. Avšak i u betonů s velmi nízkým obsahem alkálií může ASR vzniknout. Cyklické sušení a vlhčení nebo průchod elektrického proudu může způsobit

migraci alkálií a lokálně pak lze dosáhnout zvýšené koncentrace postačující k vývoji ASR. Migraci alkálií umožňuje relativní propustnost betonu. Betony vyrobené ze směsných cementů s příměsemi strusky nebo pucolánů jsou méně propustné než betony vyrobené z portlandského cementu. [7]

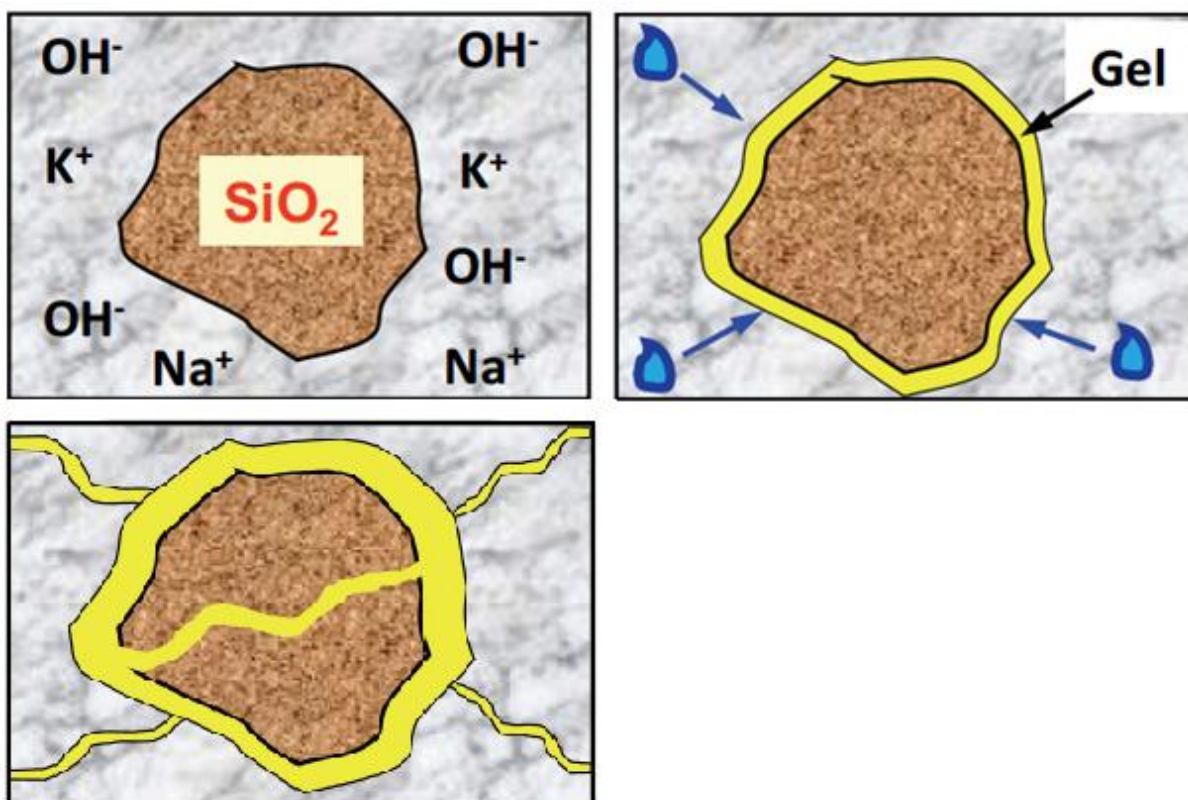
Omezením obsahu alkálií v cementu lze možnost vzniku ASR minimalizovat, je však třeba zvážit i propustnost betonu, a s ní spojenou migraci alkálií. Dále je třeba zvážit použití příměsí, které mohou propustnost betonu snižovat. [7]

4.2 VLHKOST

Pro průběh ASR je třeba dostatečné množství vlhkosti. I když je beton v prostředí s nízkou vlhkostí, zůstává v něm po relativně dlouhou dobu určité množství záměsové vody, které může ASR umožnit. U betonů s nízkým vodním součinitelem lze předpokládat, že velké množství záměsové vody bude spotřebováno při hydratačních procesech cementu. Když vnitřní vlhkost betonu klesne pod 80 %, tak se reakce zastaví. Jestliže je zajištěn dostatečný přístup vlhkosti, probíhá ASR do doby, kdy všechny reaktivní složky zreagují. [7]

5 REAKČNÍ MECHANISMY

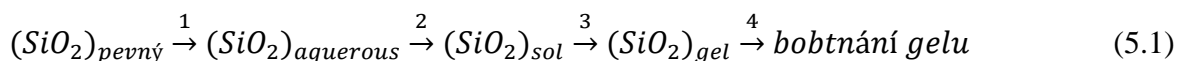
Alkalicko-křemičitou reakci lze definovat jako chemickou reakci mezi alkáliemi z pórového roztoku betonu a určitými reaktivními formami oxidu křemičitého, které jsou obsaženy v kamenivu. Produktem reakce je hygroskopický gel, který je schopen ve vlhkém prostředí adsorbovat vodu a bobtnat. Bobtnání gelu vede k expanzi a vzniku trhlin v betonu.[4]



Obrázek 2: Posloupnost vzniku ASR[4]

Poškození betonové konstrukce vlivem ASR je následkem celé řady po sobě jdoucích reakcí, mezi něž patří:

- a) rozpuštění metastabilní formy oxidu křemičitého
- b) vytvoření nano – koloidní struktury solu oxidu křemičitého
- c) gelace solu oxidu křemičitého
- d) bobtnání gelu

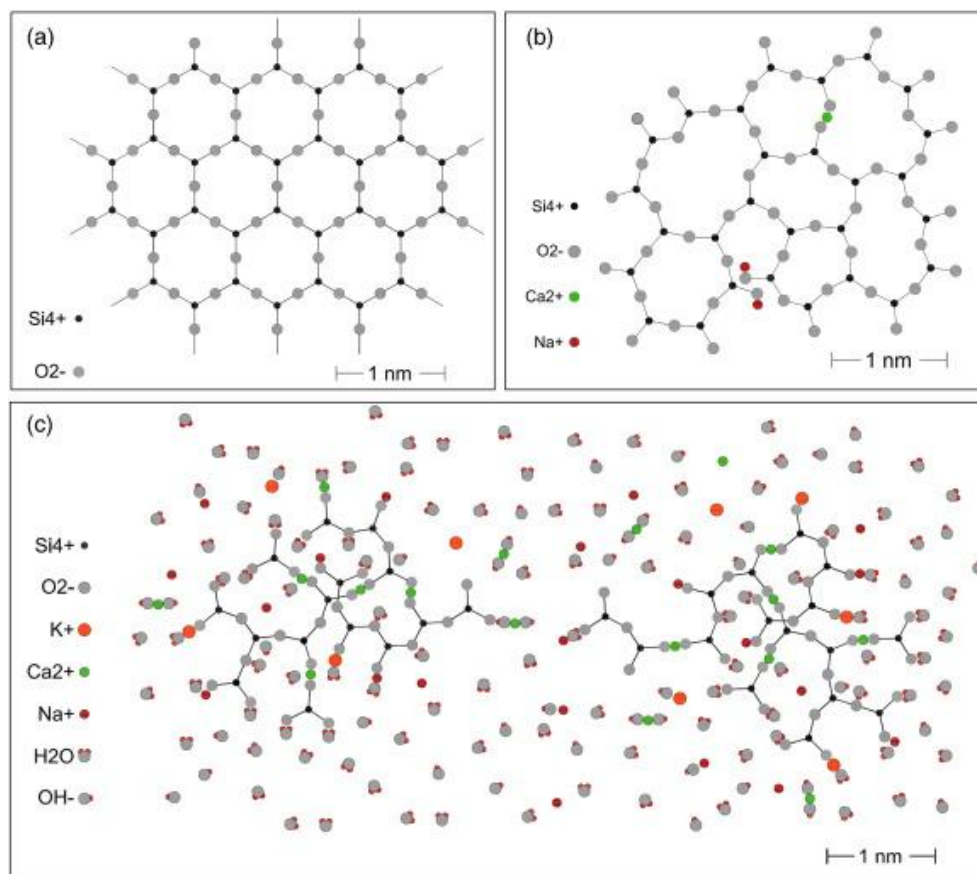


Pokud je $(SiO_2)_{pevný}$ významně poškozen, tak se může přeměnit přímo na $(SiO_2)_{gel}$.

Rozpouštění oxidu křemičitého je často nejpomalejší, a jako takové primárně ovlivňuje rychlost ASR. Faktory, které rozpouštění oxidu křemičitého urychlují, se často používají k urychlení ASR, čehož lze s výhodou využít ve zrychlených testech ASR. Mezi faktory ovlivňující rychlost reakce patří například zvýšená teplota a alkalita. [1]

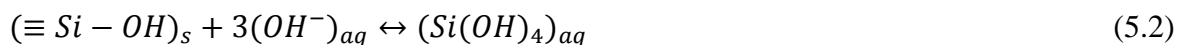
5.1 ROZPOUŠTĚNÍ METASTABILNÍHO SiO_2

Nejrozšířenější třídou horninotvorných minerálů na zemském povrchu jsou silikáty. Primárně jsou tvořeny 3D sítí tetraedrů oxidu křemičitého, s jedním atomem křemíku uprostřed obklopeným čtyřmi atomy kyslíku. Tetraedrické jednotky se spojují přes vrcholy kyslíků a tvoří siloxanové vazby ($\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$). Symbol „ \equiv “ naznačuje, že každý atom křemíku je připojen na tři další atomy kyslíku. S výjimkou čistého SiO_2 , obsahují silikáty často vodík nebo kovové prvky jako jsou sodík, draslík nebo vápník, které jsou připojeny k atomům kyslíku. Vazebný úhel vazby O-Si-O je 109° , ale vazebný úhel Si-O-Si mezi tetraedry SiO_2 se pohybuje od 100° do 170° . Výsledkem je, že struktura silikátu může být makro-krystalická, mikro/nano-krystalická nebo amorfní. [1]



Obrázek 3: (a) krystalický oxid křemičitý složený ze stejně velkých jednotek, všechny kyslíky mají Si; (b) amorfní SiO_2 ; nestejně velké jednotky s alkáliemi a vápníkem; (c) ASR gel tvořený shluky koloidních částic SiO_2 je obklopen pórovým roztokem, struktura SiO_2 velmi degradovaná se spoustou volných atomů kyslíku [8]

Jev rozpouštění SiO_2 ve vodě byl studován po více než jedno století a byly publikovány stovky článků. Bylo zjištěno, že v alkalickém prostředí hydroxylové ionty (OH^-) postupně napadají ($=\text{Si}-\text{O}-$) vazby. Tato činnost vede k rozpuštění sítě SiO_2 :



Kde ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$) představují silanolové skupiny, které se vyskytují na rozhraní oxidu křemičitého a vody.

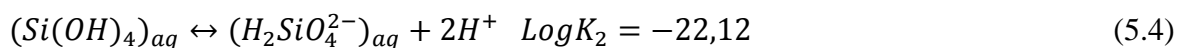
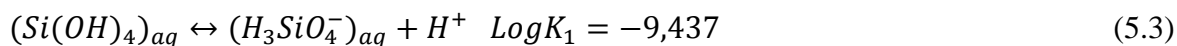
Rozpustnost produktů reakce byla stanovena pro různé formy pevného SiO_2 za různých teplot. Tyto data rozpustnosti slouží pro stanovení rovnováhy mezi rozpustností SiO_2 v neutrální vodě. Ze zjištěných hodnot vyplývá, že rozpustnost SiO_2 roste se zvyšující se teplotou.[1]

Tabulka 2: Rozpustnost SiO_2 ve vodě [1]

T [°C]	α -křemen	chalcedon	α -kristobalit	β -kristobalit	amorfní SiO_2
0	0,03	0,06	0,13	0,42	1,01
25	0,10	0,19	0,36	0,99	1,93
50	0,24	0,42	0,74	1,81	3,12
75	0,46	0,79	1,32	2,88	4,57
100	0,80	1,32	2,11	4,22	6,30

Rozpustnost neionizovaného $(\text{Si}(\text{OH})_4)_{aq}$ není příliš ovlivněna pH roztoku, jak ukazuje rovnice (5.1). Při vysokém pH vede ionizace $\text{Si}(\text{OH})_4$ k přeměně na vysoce rozpustné ionty.

Ionizace:

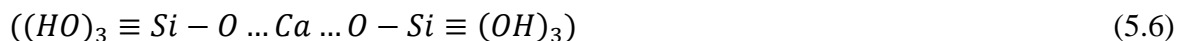
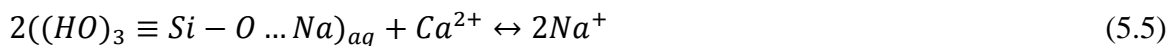


Je tedy zřejmé, že při vysokém pH se rozpustnost SiO_2 velmi významně zvyšuje. Dominantním druhem SiO_2 v roztoku jsou $(\text{H}_3\text{SiO}_4^-)$ a $(\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-})$. Dále je důležité uvést, že při vysokém pH probíhají reakce 2a,3a,3b ve směru snižování pH.

Tyto reakce ukazují, že s postupující ASR klesá hodnota pH pórového roztoku betonu. Některé alkálie obsažené v křemičitém gelu mohou být nahrazeny ionty vápníku, které tak

tyto alkálie „recyklují“ zpět do pórového roztoku betonu. Pórový roztok má tak nedostatek vápníku, což dále podporuje rozpouštění pevného portlanditu a zvyšování pH:

Recyklace alkálií:

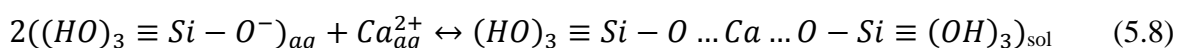


[1]

5.2 TVORBA A GELACE KOLOIDNÍHO SiO_2

Při vysokém pH je vodný roztok oxidu křemičitého záporně nabitý a vlivem elektrostatických sil je bráněno gelaci. V takovém případě se zpomaluje rozpouštění kameniva a případně dojde k jeho zastavení, přiblíží-li se Si_{aq} k mezi rozpustnosti. To však téměř nikdy nenastane u betonu, kde byl použit portlandský cement, protože ionty Ca^{2+} , nebo jiné ionty kovu obsažené v pórovém roztoku se mohou spojit s ionty křemíku a vytvoří poly-metalsylikáty.[9] [20]

Kondenzace:



Sloučenina na pravé straně rovnice může být zapsána jako $H_6CaSi_2O_8$ nebo jako CS_2H_3 . Gaboriaud tvrdí, že vápník může sloužit pouze jako katalyzátor, což vede ke vzniku siloxanových vazeb.[1]

Když vznikne jádro kritické velikosti, tak další kondenzací roste na nano-koloidní sol oxidu křemičitého. Agregací koloidních částic vznikají větší kovové silikátové struktury, které vytvářejí ASR gel nebo více kompaktní sraženiny větších rozměrů. Přítomnost portlanditu, nebo jiných ve vodě rozpustných zdrojů vápníku, je nezbytná pro tvorbu ASR gelu. Obrázek (3c) schematicky znázorňuje strukturu alkalicko-křemičitého gelu, jenž je tvořen shluky koloidních částic. Pro nedostatek prostoru a zjednodušení jsou na obrázku pouze dvě malé koloidní částice. Ve skutečnosti se jedná o částice velikosti 10 nm až 30 nm a vzdálenost mezi jednotlivými částicemi je potom dána množstvím vody obsažené v gelu. Nedávné studie zabývající se reologií alkalicko-křemičitých gelů naznačují, že se

chovají podobně jako viskózní kapaliny. To by znamenalo, že částice jsou dosti blízko u sebe, a možná jsou i slabě vzájemně propojené.[1][8]

5.3 BOBTNÁNÍ GELU

Řada jevů je zodpovědná za značnou sorptivitu a bobtnání ASR gelů. Křemičitý gel má velkou povrchovou plochu obsahující množství hydrofilních skupin, jako například –OH. Struktura gelu je pórovitá. To má za následek bobtnání gelu, adsorpci vody a osmózu. Osmóza mohla vznikat Gibbs - Donnanovým efektem, kdy se gel chová jako polopropustná membrána, jenž umožňuje malým alkalickým a hydroxylovým iontům difundovat do gelu, zatímco difuzi větších křemičitých iontů (H_3SiO_4^- nebo $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$) do pórového roztoku betonu je bráněno. To má za následek zvýšení osmotického tlaku a voda z okolního betonu se pohybuje směrem do gelu. Míra bobtnání také souvisí s tuhostí gelu, jenž je funkcí stupně tvorby příčných vazeb mezi koloidními částicemi, například vyšší Ca gely jsou obecně více viskózní a tužší.[1]

6 VLV VLASTNOSTÍ KAMENIVA NA ASR

Pochopení chování kameniva, jako hlavní reaktivní složky, je důležité pro hlubší porozumění ASR a její zmírnění či omezení. V současnosti je běžnou praxí spoléhání se na výsledky standardizovaným testů (např. accelerated mortar bar test nebo ASTM C1260) jenž klasifikují kamenivo na nereaktivní, středně reaktivní, vysoce reaktivní nebo velmi vysoce reaktivní. Tyto úrovně reaktivity často slouží k určení úrovně zmírnění ASR použitím příměsí a chemických přísad. Takový postup je jistě praktický, avšak zcela nezachycuje vliv složení kameniva a jeho fyzikálních vlastností na velikost a rychlost ASR. Zejména účinek nekřemičitých částí kameniva, například Na, K, Ca, na ASR není dostatečně vysvětlen. Také je nejasné, proč stejné kamenivo může vykazovat velmi odlišnou expanzi vlivem ASR v závislosti na velikosti částic, větší částice mohou vykazovat větší ASR expanzi, nebo proč jiné kamenivo reaguje pouze na povrchu a další pouze v rámci vnitřních mikrotrhlin a poruch. [1]

6.1 SLOŽENÍ A MINERALOGIE KAMENIVA

Poole navrhl, že je nesprávné uvažovat druh horniny (například čedič) jako kritérium pro možnost vzniku ASR. Namísto toho, je třeba zaměřit pozornost na minerální složení dané horniny. Termodynamická stabilita křemičitých minerálů klesá se zvyšujícím se stupněm poruch mikrostruktury. Je známo, že nejvíce reaktivní jsou amorfní formy SiO_2 , jako jsou opál, přírodní nebo umělé sklo, následují meta-stabilní krystaly jako kristobalit, trydimit, a jiné krystalické formy obsahující množství vnitřních mikrotrhlin. Amorfní formy vznikají v důsledku rychlého ochlazení horniny v roztaveném stavu. Mikrotrhliny potom vznikají deformací horniny vlivem geologických sil a také během zpracování a drcení kameniva. Některé přírodní materiály, které byly klasifikovány jako reaktivní, jsou uvedeny v tabulce 3. Kamenivo obvykle obsahuje více než jeden minerál a objem reaktivního minerálu potřebného pro vznik škodlivé ASR může být menší než 1 %. Pórovitá matrice horniny nebo přítomnost trhlin v kamenivu umožní přístup pórového roztoku betonu k reaktivnímu oxidu křemičitému uvnitř kameniva. Oxid křemičitý je mikro-porézní, to znamená, že má velkou povrchovou plochu, což je výhodné pro vznik ASR. [1][3]

Tabulka 3: Některé reaktivní přírodní materiály [3]

reaktivní složka	fyzikální forma	horniny, v kterých je obsažen	výskyt
opál	amorfní; velmi reaktivní	křemičité (opálové vápence, rohovce, pazourky, břidlice)	rozsáhlý
křemičité sklo	amorfní	vulkanická skla (ryolitové, andezitové, dacitové), tufy, syntetická skla	oblasti vulkanického původu, říční kamenivo z vulkanické oblasti, obalové sklo
kristobalit a trydimit	krystalická	opálové horniny, pálená keramika	mimořádný
chalcedon	nedokonale krystalický křemen	rohovce, pazourky, křemičité vápence a pískovce	rozsáhlý
Křemen	krystalický	vyvěřelé a metamorfované horniny (např. žula, břidlice), písky, pískovce	běžný, reaktivní jako mikrokystalický

6.2 ROZMĚR KAMENIVA

Obecně se dá předpokládat, že se snižující se velikostí částic se bude expanze zvětšovat, a to z důvodu většího povrchu reagujících částic. Avšak tato závislost není pravidlem. Stanton při zkoumání reaktivity křemičito-hořečnatého vápence zjistil, že největší reaktivitu vykazují částice o velikosti 0,18 mm až 0,6 mm, zatímco částice menší žádnou expanzi nevykazovaly. Podobných výsledků dosáhl Payet, který zjistil, že nejmenší frakce pazourku alkalicko-křemičitou reakci dokonce zmírňují. Při použití křemičitého vápence je největší expanze dosahováno při velikosti zrn 1,25 mm až 3,25 mm. Zajímavé je chování křemičitých úletů. Když jsou částice mikrosiliky dobře dispergovány, tak zmírňují ASR, avšak v případě nedokonalé dispergace tvoří shluky, jež napomáhají vzniku ASR. Rozdíly v reaktivnosti částic různých velikostí jsou způsobeny časem potřebným k difundaci OH^- iontů do reaktivních míst, které mohou být uvnitř kameniva.[1] [10]

Z toho lze vyvodit že:

- a) reaktivita závisí na velikosti částic, avšak ne vždy jsou menší částice reaktivnější
- b) závislost reaktivity na velikosti je částic může být pro různé druhy kameniva odlišná
- c) testuje se kamenivo takové velikosti, která bude použita pro výrobu betonu (například drcení potenciálně reaktivního hrubého kameniva pro testování reaktivity podle ASTM C227 nebo C1260 je chybné) [1]

6.3 REAKCE NA POVRCHU A UVNITŘ, RYCHLOST REAKCE

Reaktivita kameniva je dána dostupností alkalického pórového roztoku k reaktivnímu oxidu křemičitého. Je-li kamenivo složeno pouze z reaktivního oxidu křemičitého, jako je tomu v případě vulkanických skel, může povrch kameniva rychle reagovat s alkáliemi pórového roztoku a tvořit ASR gel. Reaktivní oxid křemičitý nemusí být obsažen na povrchu, ale může být ve formě jemných částic rozptýlen v nereaktivní matici kameniva, jako je tomu například u drob nebo křemičitých vápenců. Pórovému roztoku pak trvá určitou dobu, než se dostane do kontaktu s reaktivním oxidem křemičitým. V takovém případě potom reakce probíhá mnohem pomaleji. Také přítomnost mikro trhlin v kamenivu hraje určitou roli. Chemické složení na povrchu kameniva se může lišit od chemického složení na povrchu vnitřních mikrotrhlin. Navíc se zvětšujícím se povrchem roste i rychlost

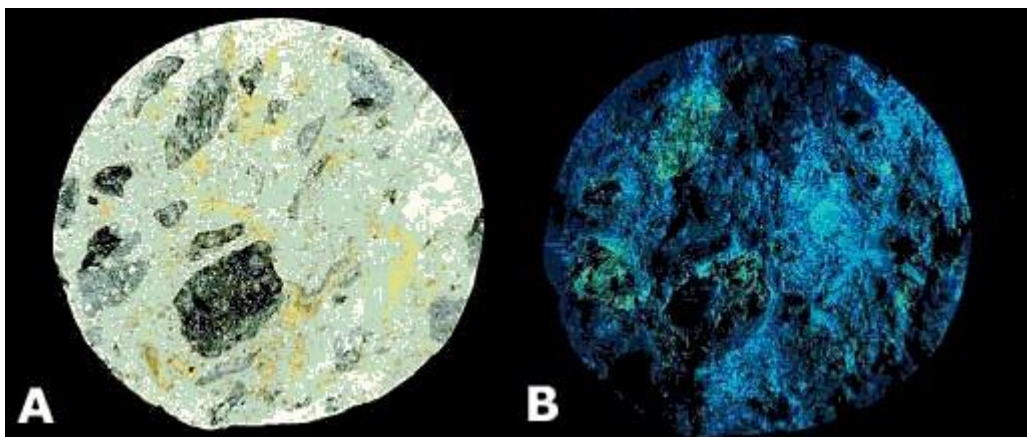
reakce. ASR tak může postupovat zcela libovolně mikrotrhlinami uvnitř kameniva, což vede ke vzniku dalších trhlin a poškození. [1]

7 ZKOUŠKY PRO HODNOCENÍ ASR VE ZTVRDLÉM BETONU

Při posuzování přítomnosti produktů ASR jsou používány kvalitativní kolorimetrické zkoušky. Během doby, po kterou je ASR sledována, byly vyvinuty jednoduché diagnostické metody detekce vzniku a lokalizace křemičitých gelů přímo v konstrukcích. Uvedené kolorimetrické metody mohou sloužit ke stanovení přítomnosti produktů ASR in situ. [11]

7.1 URANYLACETÁTOVÁ METODA

Metoda byla vyvinuta Starkem v roce 1991. Tato metoda je založena na vzájemném působení roztoku uranylacetátu $[\text{UO}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2]$ v kyselině octové s alkalicko-křemičitými gely. Na povrch zkoumaného betonu je nanášen roztok uranylacetátu v kyselině octové. Na negativně nabitým povrchu alkalicko-křemičitého gelu dochází k sorpci UO^{2+} . Následně je sledovaný povrch ozářen UV světlem. Přítomnost gelu se potom projevuje zelenožlutými skvrnami. Metoda je použitelná na všechny povrchy betonu. Zkušenosti však ukázaly, že nejlepší je metodu aplikovat na nově připravené povrchy v podobě řezných ploch nebo vývrtů. Nevýhodou uranylacetátové metody je to, že se používá sloučenina obsahující mírně radioaktivní izotop uranu. Tato metoda je obsažena například v doporučeních USA nebo Francie pro hodnocení přítomnosti alkalicko-křemičitých gelů. [11] [12]



Obrázek 4: (A) Vzorek s roztokem uranylacetátu - běžné světlo; (B) Vzorek s roztokem uranylacetátu – UV světlo [12]

7.2 RHODAMINOVÁ METODA

Metodu vyvinul Guthrie v roce 1997. Během doby se mění složení alkalicko-křemičitých gelů, především se zvyšuje obsah vápníku. Pro stanovení přítomnosti alkalicko-křemičitých gelů se zvýšeným obsahem vápníku se používá rhodamin B. Chemický vzorec rhodaminu je $(C_{28}H_{31}N_2O_3Cl)$. Na povrch betonu je nanesen roztok rhodaminu B. Místa s obsahem alkalicko-křemičitých gelů bohatých na vápník se zbarví růžově. Růžově se však mohou zbarvit i některé vápenaté složky hydratovaného cementu. [7]

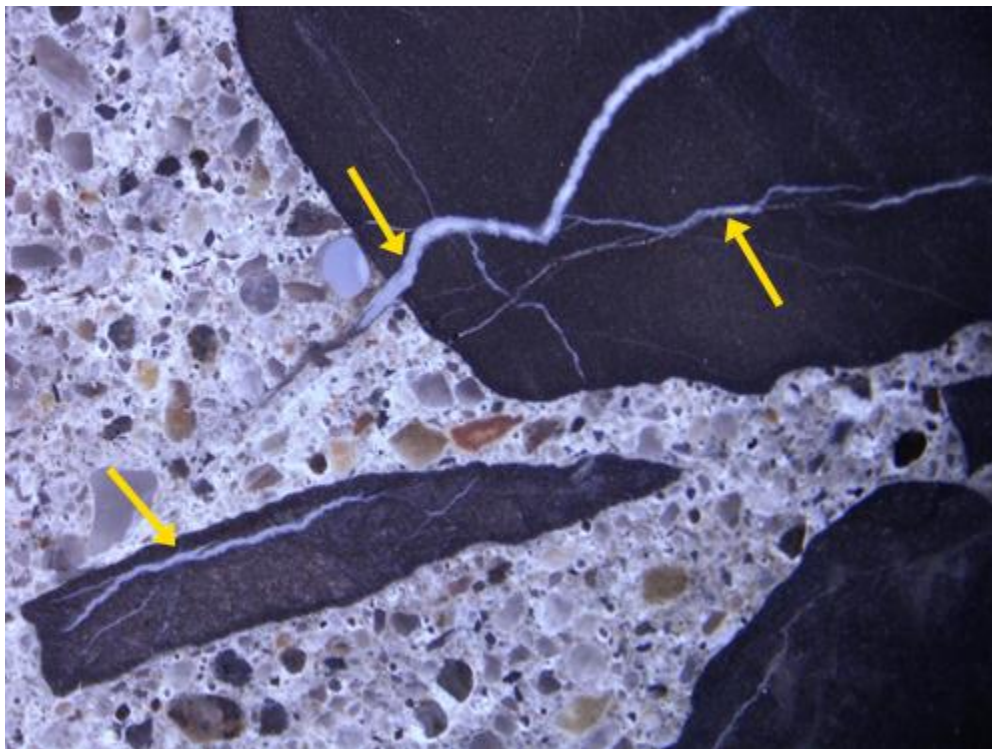
7.3 HEXANITROKOBALTITANOVÁ METODA

Metodu vyvinul opět Guthrie v roce 1997. Vznikající alkalicko-křemičitý gel je bohatý na Na^+ a K^+ ionty. Při této metodě se používá hexanitrokobaltitan sodný, $Na_3Co(NO_2)_6$, který reaguje s draslíkem obsaženým v alkalicko-křemičitém gelu. Produktem reakce je žlutá sraženina. Po nanesení roztoku hexanitrokobaltitanu sodného se v místech, kde se nachází alkalicko-křemičité gely, objeví žluté skvrny. Pro přípravu roztoku se používá deionizovaná voda. Podobně jako při použití uranylacetátu může být práce s hexanitrobaltitanem sodným spojena se zdravotními riziky. [7] [12]

7.4 DŮKAZ ASR MIKROSKOPICKY

Jedná se o vizuální posouzení přítomnosti ASR v konstrukci. Diagnostikování ASR založené pouze na této metodě však není příliš spolehlivé. V některých případech je možné pozorovat průhledný alkalicko-křemičitý gel. Nachází-li se gel uvnitř zrna kameniva, tak

může být zrnitý, zatímco uvnitř ztvrdlé cementové kaše má gel sklovitý charakter. Dále je možné pozorovat barevně odlišné prstence v částicích reaktivního kameniva a jejich okolí, což je považováno za indikátor ASR. Takové prstence mohou vznikat i z jiných příčin, proto je třeba je posuzovat s určitou opatrností. Na výbrusech lze mikroskopickým pozorováním sledovat rozptýlený hydroxid vápenatý. V okolí reaktivních částic je jeho obsah snížen. Tento úkaz se objevuje ještě před vznikem gelu a trhlin. [11]



Obrázek 5: Mikrofotografie leštěného vzorku betonu s trhlinami v kamenivu; trhliny jsou vyplněny gelem ASR [13]

8 ZMÍRNĚNÍ ASR

Alkalicko-křemičitá reakce požaduje čtyři hlavní předpoklady:

- 1) zdroj reaktivního oxidu křemičitého (běžně obsažen v kamenivu)
- 2) alkálie, přesněji OH^- ionty obsažené v pórovém roztoku betonu, které napadnou oxid křemičitý
- 3) zdroj rozpustného Ca (např. portlandit) pro reakci s rozpuštěným oxidem křemičitým a k tvorbě škodlivého gelu

4) přístup vlhkosti umožňující expanzi gelu

Metody vedoucí ke zmírnění ASR se zaměřují na eliminaci jednoho nebo více těchto předpokladů.

Tyto metody lze dále rozdělit na ty, jež jsou použitelné pro nově vznikající betonové konstrukce a metody, které mohou být použity pro konstrukce stávající. Pro nové konstrukce jsou k dispozici tyto možnosti zmírnění ASR:

- používáním nereaktivních kameniv
 - vznik expanze méně než 0,04% podle ASTM C1293
 - vznik expanze méně než 0,1% podle ASTM C1260
 - vzhledem k omezené dostupnosti takovýchto kameniv, není tato možnost často možná
- omezením obsahu alkálií v betonu
 - např. maximální obsah alkálií $\text{Na}_2\text{O}_e = 1,8 \text{ kg/m}^3$ (dosaženo použitím nízko alkalického cementu), specifikováno AASHTO-PP65 pro konstrukce se středním rizikem vzniku ASR
 - u konstrukcí s vysokým rizikem ASR, například komponenty infrastruktury používající středně až vysoce reaktivního kameniva, nemá být omezení alkálií v betonu jedinou strategií zmírňování ASR
- použití doplňkových cementových materiálů (SCM)
 - nejběžnější metoda zmírnění ASR
 - nejúčinnější SCM jsou ty s nízkým obsahem CaO a alkálií
 - možné komplikace
 - náhradou části portlandského cementu SCM může negativně ovlivnit některé vlastnosti betonu jako třeba vývoj pevností
 - dostupnost kvalitních SCM; v některých lokalitách elektrárny přecházejí na jiná paliva než je uhlí a nové předpisy o životním prostředí vedou k produkci popílků nevyhovujícím normám
 - tlak na jiné zdroje SCM (vysokopecní struska), potřeba vývoje nekonvenčních a ekonomicky přijatelných zdrojů SCM
- přísady na bázi lithia
 - např. LiNO_3
 - nevýhodou je vysoká cena a omezená dostupnost

Oproti nově vznikajícím konstrukcím jsou možnosti zmírnění ASR ve stávajících konstrukcích mnohem více omezeny. Ošetření lithiem (např. vakuová impregnace, elektrochemická impregnace) má omezenou účinnost vlivem malé hloubky penetrace, která je 10 mm až 20 mm. Elektrochemická impregnace dosahuje větší hloubky penetrace, kde Li^+ ionty aplikované na povrch jsou elektrostatickými silami přitahovány k záporně nabitému prutu armatury. V dnešní době je nejschůdnější metodou pro zmírnění ASR u stávajících konstrukcí omezení přísunu vlhkosti, a to aplikací penetračním tmelů, lepšího odvodnění nebo použití opláštění/obkladů. Dále jsou metody sloužící k léčbě symptomů, nikoli příčin ASR, zahrnující například výplň trhlin, jenž snižuje riziko poškození účinky mrazu. [1] [14]

9 ZKUŠENOSTI S ASR V NĚMECKU

První případ škodlivé ASR se objevil koncem šedesátých let v severním Německu. Zkoumání tohoto případu ukázalo, že reaktivními složkami v použitém kamenivu byl rohovec a pískovec tmelený opálem. Aby se předešlo dalším případům výskytu alkalicko-křemičité reakce, byly vyvinuty metody pro hodnocení reaktivnosti kameniva, na jejichž základě byla roku 1974 vypracovaná první alkalická směrnice, kterou vypracoval Německý výbor pro železobeton DAfStb (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton). Současně s vypracováním směrnice Ludwig a spolupracovníci vysvětlili vliv složení kameniva, vliv prostředí na stupeň poškození betonu, a že mechanismus poškození betonu vlivem alkalicko-křemičité reakce je založen na osmotickém tlaku. Roku 1997 byla vydaná aktualizovaná alkalická směrnice, ve které byly zahrnuté zkušební metody a doporučení pro předcházení škod způsobených ASR pro křemičité břidlice, prekambriké droby a porfyry z východoněmeckých spolkových států. Velká pozornost je v poslední době věnována urychleným metodám stanovení alkalické reaktivity kameniva. V Německu byly použity mezinárodně uznávané zkušební metody a jejich modifikace pro co nejlepší určení reaktivnosti kameniva v německých podmínkách. [15]

9.1 SOUČASNÝ STAV

Bylo vyvinuto mnoho zkušebních metod pro hodnocení reaktivnosti kameniva a posouzení betonu s ohledem na riziko výskytu alkalicko-křemičité reakce. Reálné podmínky nelze přesně modelovat pouze jednou zkušební metodou. Zkušební metody pro kamenivo slouží

ke klasifikaci kameniva jako reaktivní, potenciálně reaktivní nebo nereaktivní. Jedná se o urychlené zkoušky rozpínání maltových trámečků nebo zkoušky betonových trámů. Použitím zkušebních metod by mělo být možné stanovit náchylnost betonu ke vzniku škodlivé alkalicko-křemičité reakce. [15]

9.2 HODNOCENÍ KAMENIVA

Je třeba rozlišit, zda se bude reaktivnost testovat u hutného nebo pórovitého kameniva. Popisované metody budou pro hutné kamenivo. [15]

9.2.1 Urychlená zkouška rozpínání maltových trámečků

Výhodou je, že tato zkouška umožní hodnotit reaktivnost kameniva v krátkém čase. Avšak některá kameniva jsou pomocí této metody hodnocena velice přísně, což může vést k jejich nesprávnému vyloučení pro použití do betonu. Pro urychlenou metodu je třeba zrna šterku podrtit. Ve skutečnosti se však budou v betonu vyskytovat ve stavu nepodrceném a výsledky zkoušky reaktivity jsou tak odlišné od skutečnosti. Při hodnocení reaktivity u horno-rýnského šterku J. Stark stanovil drcený šterk jako reaktivní a zkouškou neprošel. U nedrceného šterku pak byla reaktivnost o mnoho menší. Na druhé straně výsledky hodnocení reaktivity u drceného a nedrceného šterku ze středního Německa byly stejné. Příčiny takovýchto odlišností je třeba ještě objasnit. V Německu se používá DAfStb a LMPA urychlená metoda rozpínání maltových trámečků. [15]

DAfStb metoda

Jedná se o urychlenou metodu pro stanovení reaktivnosti kameniva. Maltové trámečky o rozměrech $40 \times 40 \times 160$ mm jsou ponořené do roztoku hydroxidu sodného a jsou uloženy při teplotě $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Při zkoušce se pozoruje délková změna. Porovnávací měření se provádí po 14 dnech. Podle prodloužení se určí, zda je kamenivo reaktivní či nikoli. Hraniční hodnota prodloužení je 1 mm/m.

Příprava kameniva

- kamenivo se drtí na jednotlivé frakce (4 mm, 1 mm, 0,5 mm, 250 μm , 125 μm)
- promytí a sušení kameniva při $110 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- navážení jednotlivých frakcí
- stanovení nasákavosti kameniva

Použitý cement

$(Na_2Oe = 1,3 \pm 0,1 \%)$

Příprava maltových trámečků

- naváží se 555 g cementu a 1250 g kameniva
- vodní součinitel $w = 0,47$; je třeba započítat i vodu ze zkoušky nasákavosti
- zamíchání směsi a příprava maltových trámečků dle EN 196-1

Uložení trámečků

- vzorky ve formách se uloží na 24 ± 2 h do prostředí s teplotou $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkostí větší než 90 %
- po odformování se vzorky označí a ponoří do destilované vody na 24 h při teplotě $80\text{ }^{\circ}\text{C}$
- po 24 h v destilované vodě se provede nulové měření L_0
- trámečky se uloží do ocelových nádob s 3000 ml 1 molárního roztoku NaOH s teplotou $80\text{ }^{\circ}\text{C}$; trámečky leží na mřížkách, nejsou v přímém kontaktu s roztokem
- nádoby se opatří poklopem a nachází se v prostředí o teplotě $70 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- další měření se provádí po 1, 2, 7, 14, a 28 dnech (L_n)

Expanze vzorků se potom vypočte ze vztahu:

$$Expanze = \frac{L_n - L_0}{L_0} \cdot 100 [\%]$$

LMPA metoda

Při této metodě se stejně jako u DAFStb sleduje délková změna maltových trámečků, které mají rozměry $40 \times 40 \times 160$ mm. Záměsová voda je nahrazena jedno molárním roztokem hydroxidu sodného. Trámečky jsou uloženy při teplotě $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nachází se nad hladinou vodní lázně. Délková změna se sleduje po 21 dnech, a jako hraniční hodnota prodloužení trámečků se uvažuje 2 mm/m. [15]

Příprava kameniva

- kamenivo se drtí na jednotlivé frakce (4 mm, 1 mm, 0,5 mm, 250 μm , 125 μm)
- promytí a sušení kameniva při $110 \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$
- navážení jednotlivých frakcí

Použitý cement

CEM I 42,5 R

$Na_2Oe = 0,8 \%$

Příprava maltových trámečků

- naváží se 450 g cementu a 1350 g kameniva
- vodní součinitel $w = 0,50$; záměsová voda nahrazena 1 molárním roztokem NaOH
- zamíchání směsi a příprava maltových trámečků dle EN 196-1

Uložení trámečků

- vzorky ve formách se uloží na 24 ± 2 h do prostředí s teplotou $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a relativní vlhkostí větší než 90 %
- po odformování se vzorky označí a provede se nulové měření L_0

9.2.2 Výsledky

Doposud provedené zkoušky a měření ukázaly, že obě metody pro stanovení reaktivnosti dávají, až na pár výjimek, stejné výsledky. Také se zjistilo, že DAFStb metoda je z hlediska hodnocení reaktivnosti o něco přísnější než metoda LMPA. Porovnání výsledků zkoušek je uvedeno v tabulce 5. [15]

Tabulka 4: Výsledky zkoušek podle metody LMPA (L) a DAFStb (D) [15]

Kamenivo frakce 8/16	Expanze [mm/m]									
	1 den		7 dní		14 dní		21 dní		28 dní	
	D	L	D	L	D	L	D	L	D	L
Droba	0,165	0,610	1,549	3,426	2,322	4,817	2,451	5,114	3,425	5,291
Pískovec tmelený opálem	0,175	0,582	0,763	1,146	1,599	1,916	1,738	2,233	3,128	2,429
Štěrk s rohovcem	0,211	0,537	0,711	1,040	1,554	1,748	1,695	2,203	3,065	2,223
Granit	0,130	0,587	0,341	0,878	0,559	1,088	0,596	1,417	0,921	1,615
Granodiorit	0,096	0,598	0,522	1,296	0,990	1,805	1,068	2,252	1,904	2,471

9.2.3 Zkoušky betonových trámů

Dlouhotrvající zkušební metody používané v Německu jsou zkoušky vykonané při teplotě $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve vlhké komoře a zkoušky probíhající za teploty $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nevýhodou zkoušky při teplotě $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ je doba jejího trvání, která dosahuje délky 9 měsíců. Mezinárodně používaná je zkouška vykonaná při teplotě $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, která poskytuje výsledky již po 3 měsících.

Uložení ve vlhké komoře a teplotě 40 °C

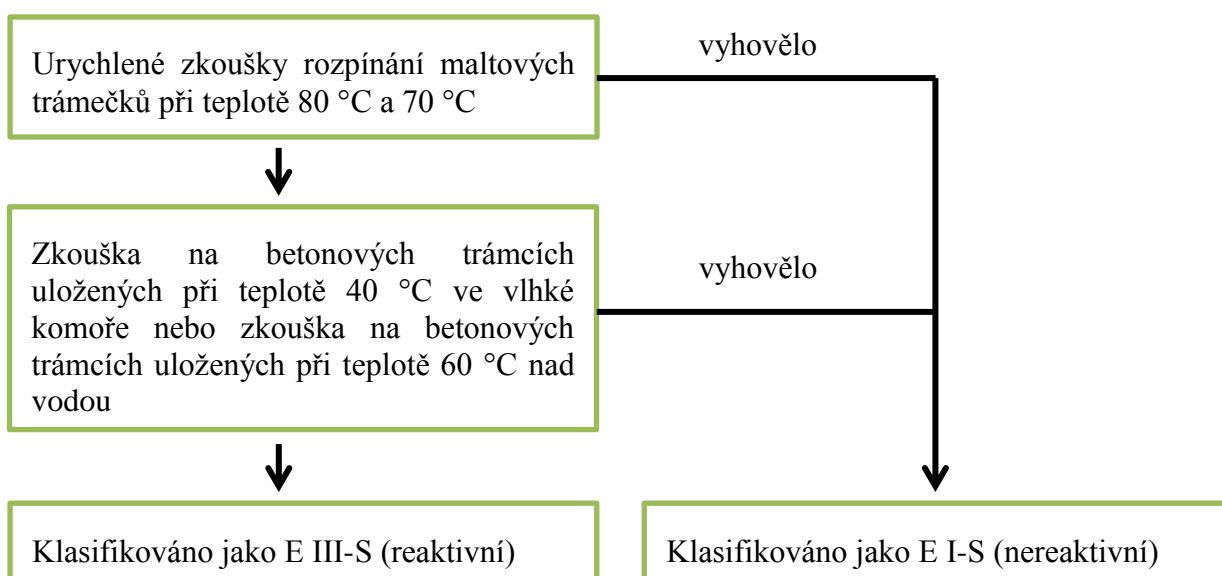
Frakce 2/16 mm nebo 2/22 mm se zkouší použitím třech betonových trámců $100 \times 100 \times 50$ mm a jedné kostky o hraně 300 mm. Zkušební tělesa jsou uložena v mlžné komoře při teplotě 40 °C a relativní vlhkosti 100 % po dobu 9 měsíců. Aby bylo kamenivo klasifikované jako nereaktivní, nesmí prodloužení trámců přesáhnout hodnotu 0,6 mm/m a maximální šířka trhliny musí být menší jako 0,2 mm. [15]

Zkouška za teploty 60 °C

Frakce 2/16 mm nebo 2/22 mm je použita na přípravu tří trámců o rozměrech $75 \times 75 \times 280$ mm. Po odformování jsou trámce uloženy při 60 °C nad vodou v utěsněném kontejneru. Prodloužení se zjišťuje měřením délky trámců při 20 °C. Měření se provádí po 0, 4, 8, 12, 16 a 20 týdnech od přípravy vzorků. Hraniční hodnota prodloužení po dvanácti týdnech je stanovena na 0,3 mm/m. [15]

9.3 STRATEGIE TESTOVÁNÍ

Nejprve je třeba provést petrografické zkoumání kameniva. Potom následuje urychlená metoda rozpínání maltových trámečků na třech vzorcích každého kameniva. Jestliže kamenivo projde touto zkouškou, nejsou třeba žádné další zkoušky. V opačném případě se vykoná zkouška na betonových trámcích a kostkách. Projde-li kamenivo touto zkouškou, tak se žádné další měření neprovádí. Když kamenivo zkouškou neprojde, je klasifikováno jako reaktivní. Postup testování je znázorněn v diagramu. [15]



10 CEMENTOBETONOVÉ KRYTY

Cementobetonové kryty jsou vhodné pro stavbu silnic, dálnic, letištních drah a pro těžce zatížené průmyslové plochy. Takovéto kryty musí zajišťovat bezpečný provoz, musí odolávat povětrnostním vlivům a musí být schopné přenášet síly vyvolané účinkem dopravy. Používá se betonový kryt jednovrstvý nebo dvouvrstvý. Dvouvrstvý cementobetonový kryt je betonovaný dvoufázově. Horní obrušná vrstva je pokládána na čerstvý beton vrstvy spodní. [16]

Cementobetonové kryty jsou dle normy ČSN 73 6114 členěny do tří skupin. Zařazení vozovek s cementobetonovým krytem do jednotlivých skupin je uvedeno v tabulce 6. [16]

Tabulka 5: Členění cementobetonových krytů [16]

specifikace komunikace	třída dopravního zatížení podle ČSN 73 6114 změny Z1 ¹⁾	dopor. nejnižší zařazení do skupiny
letištní dráhy a plochy, dálnice, rychlostní komunikace, silnice I. třídy	S, I – III	CB I
silnice II. a III. třídy, sběrné místní komunikace, obslužné místní komunikace, odstavné a parkovací plochy	III – V	CB II
obslužné místní komunikace, odstavné a parkovací plochy, dočasné komunikace a účelové komunikace	IV - VI	CB III
¹⁾ netýká se letištních drah a ploch		

10.1 ROZDÍLY MEZI CEMENTOBETONOVÝM A ASFALTOVÝM KRYTEM VOZOVEK

V České republice je často vedena diskuze o tom, jestli je vhodnější cementobetonový (CB) nebo asfaltový kryt. Rozdíly lze hodnotit z hlediska správce komunikace a z hlediska uživatele. [17]

10.1.1 Rozdíly z hlediska správce

Výhody CB krytu:

- delší životnost bez nutnosti oprav
- minimální provozní náklady (při správném návrhu a provedení konstrukce)
- z hlediska celoživotních nákladů výhodnější než asfaltové vozovky

Nevýhody CB krytu:

- delší doba trvání oprav
- složitější technologie oprav
- povrch narušen spárami [17]

Tabulka 6: Srovnání celkových nákladů na úsecích vozovek s CB a asfaltovým krytem na dálnici D1 [18]

stavba v provozu	017 CB kryt Brno západní přivaděč – V. Bíteš 1972 – 2002 (39 let)	019 asfaltový kryt Brno jih – Brno západní přivaděč 1976 – 2002 (35 let)
pořizovací náklady (Kč/m ²)	267,13	234,00
náklady na opravy a údržbu (Kč/m ²)	561,98	956,06
celkové náklady (Kč/m ²)	829,11 69,1 % z nákladů na asfaltový kryt	1199,06

10.1.2 Rozdíly z hlediska uživatele

Výhody CB krytu:

- dobré protismykové vlastnosti
- absence vyjetých kolejí vznikajících vlivem velkého zatížení
- beton nepohlcuje světlo tak jako černý asfalt, je tedy za jízdy v noci bezpečnější

Nevýhody CB krytu:

- hlučnost
- schůdky na spárách

Uvedené nevýhody se týkají starší technologie jednovrstvé betonáže.

Dlouhá životnost CB krytu je paradoxně tím, co v očích uživatelů CB krytu škodí. Většina veřejnosti hodnotí CB kryt z pohledu uživatele dálnice D1, kde posuzuje pohodlí jízdy na krytu starém více jak 35 let, který je na konci životnosti. Komfort jízdy potom uživatel porovná s přilehlými asfaltovými úseky, na kterých je komfort jízdy vyšší, neboť byly po dobu provozu již několikrát vyměněny a vybudovány na vyšší úrovni, ovšem za vyšší provozní náklady. [17]



Obrázek 6: Schůdky na spárách na D1 (u Rousínova) – rok 1988 [17]

11 VYLOUČENÍ ALKALICKÉ REAKCE KAMENIVA V BETONU NA STAVBÁCH POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ – TP 137

V České republice dochází a nadále může docházet k poruchám betonových konstrukcí vlivem alkalického rozpínání kameniva v betonu. Opatření provedená podle těchto technických podmínek mají zabránit těmto škodám vzniklých na pozemních komunikacích. Tyto technické podmínky musí být uplatněny při zadání všech staveb pozemních komunikací, kde budou prováděny práce většího rozsahu, jako jsou stavby mostních objektů pozemních komunikací nebo cementobetonových krytů vozovek. [19]

11.1 KAMENIVO DO BETONU

Podle dosavadních poznatků zjištěných ověřováním hornin pro výrobu kameniva do betonu v České republice je možno provést předběžné orientační rozdělení vybraných hornin podle tabulky 7. [19]

11.1.1 Vyloučené petrografické typy hornin

Seznam hornin, se kterými jsou dlouhodobé negativní zkušenosti a jsou pro výrobu kameniva do betonu na stavbách pozemních komunikací v ČR zakázány.

- a) andezit – České středohoří
- b) proterozoické metadroby – lokalita Zbraslav, JV křídlo oblasti Barrandienu
- c) vápenec s křemennými rohovci – oblast Barrandienu
- d) buližník vč. buližníku z předrcených hrubých frakcí ze suroviny těženého kameniva – terasy Vltavy a Labe
- e) droby a slepencové droby – kamenivo těžené v jižní části Oderských vrchů

Uvedené horniny jsou vyloučeny na základě příslušnosti k petrografickému typu horniny a lokalitě, ve které jsou negativní zkušenosti s použitím kameniva do betonových konstrukcí. [19]

Tabulka 7: Informativní tabulka reaktivnosti hornin [19]

reaktivnost	skupina hornin	zpevněné/nezpevněné	petrografický druh
A - nízká	magmatické		žula, granodiorit, gabro, čedič, melafyr, diabas, znělec
	sedimentární	zpevněné	vápence bez přítomnosti rohovců
		nezpevněné	čistý křemitý písek
	metamorfované		granulit, amfibolit, hadec, krystalický vápenec
B - střední	magmatické		ryolit, porfyr, melafyr s mandlovci, žula
	sedimentární	zpevněné	droba, slepencové droby
		nezpevněné	písek, štěrkopísek (dle oblasti výskytu)
	metamorfované		pararula, ortorula, rohovec, metadroba, prachovcové břidlice
C - vysoká	magmatické		ryolit, porfyr, porfyrít, vulkanické sklo, sopečný tuf obsahující křemen
	sedimentární	zpevněné	droba, křemenec, dolomit, vápenec s rohovcem organického původu
		nezpevněné	písek, štěrkopísek (dle oblasti původu)
	metamorfované		rohovec obsahující křemen, metadroba, bulžník, kvarcit
D – vyloučené petrografické typy hornin			

11.2 POŽADAVKY NA SLOŽENÍ BETONU

Beton nacházející se v prostředí se stupněm vlhkosti XW3 podle tabulky 7 může při návrhu obsahovat maximálně 3,5 kg Na₂O eq. na jeden m³ při použití nízko reaktivního

kameniva A, maximálně 2,5 kg Na₂O eq. na jeden m³ při použití středně reaktivního kameniva B. [19]

Beton nacházející se v prostředí se stupněm vlhkosti XW2 může při návrhu obsahovat maximálně 3,5 kg Na₂O eq. na jeden m³ při použití středně reaktivního kameniva B, maximálně 4,5 kg Na₂O eq. na jeden m³ při použití středně reaktivního kameniva A. [19]

Tabulka 8: Definice stupňů vlhkosti prostředí pro ztvrdlý beton [19]

zkratka stupně prostředí	stupeň vlhkosti – slovní vyjádření	popis a příklady
XW1	suchý	části betonových konstrukcí, které zůstávají při normálním ošetřování betonu krátce vlhké a po vyschnutí během používání trvale suché a) vnitřní část konstrukcí pozemních staveb
XW2	vlhký	části betonových konstrukcí, které jsou během užívání často nebo delší dobu vlhké, včetně částí opatřených nátěry nebo povlaky a) základy, piloty, opěrné zdi b) nechráněné vnější části konstrukcí, které jsou vystaveny například srážkám, povrchové vodě nebo půdní vlhkosti
XW3	vlhký s přísunem alkálií z vnějších zdrojů	části betonových konstrukcí, které jsou mimo vlhké prostředí (XW2) ještě dodatečně vystaveny častějšímu nebo dlouhodobému přísunu alkálií z vnějších zdrojů a) části konstrukcí vystavené mořské vodě b) cementobetonové kryty, letištní plochy, části ostřikované vodou, nechráněné části mostních konstrukcí a tunelů

II. PRAKTICKÁ ČÁST

12 CÍL

Cílem praktické části bylo ověřit, zda na vzorcích betonu odebraných z úseku dálnice D1 probíhá ASR. Pro toto ověření byly vybrány metody, které mohou sloužit pro rychlé a levné diagnostikování ASR v betonových konstrukcích.

13 POUŽITÉ MATERIÁLY

13.1 VZORKY BETONU

Byly použity jádrové vývrty z různých úseků dálnice D1. Jednalo se o vozovku s CB krytem. Vývrty poskytla společnost CONSULTTEST s.r.o.

Informace o použitých vzorcích jsou uvedeny v tabulce 10 a 11.

Tabulka 9: Základní informace o odebraných vzorcích

označení vývrtu	datum odběru	úsek dálnice	směr	staničení [km]	stáří konstrukce	celková tloušťka [mm]
4	22. 11.2016	Jihlava – Větrný Jeníkov	Praha	115,420	29 let	500
16	9. 12.2016	Velká Bíteš - Ostrovačice	Brno	175,350	33 let	489
19	12. 12.2016	Kývalka - Brno	Brno	185,700	25 let	531

Tabulka 10: Lokality použitých kameniv

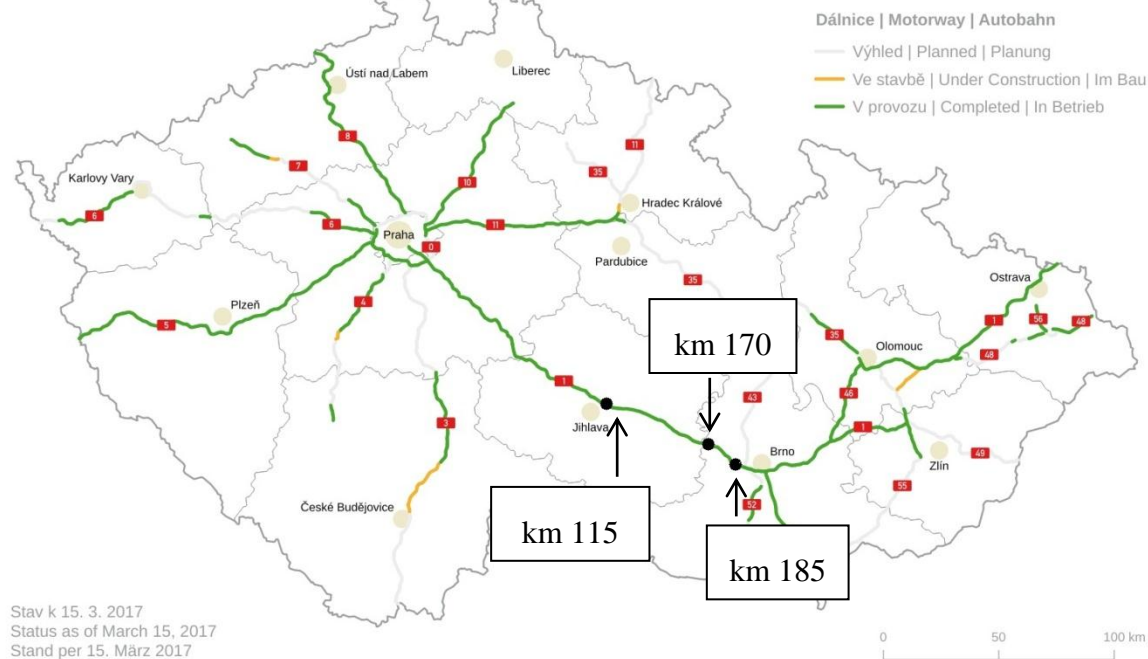
označení vzorku	lokalita kameniva a druh horniny	
	drobné kamenivo	hrubé kamenivo
4	Tovačov – štěrkopísek	Rančířov – biotitická-silimanická rula s vložkami aplitu
16	Tovačov – štěrkopísek	Olbramovice – granodiorit
19	Tovačov – štěrkopísek	Želešice – amfibolit

Dálnice v České republice

Motorways in the Czech Republic
Autobahnen in Tschechische Republik

 **ceskedalnice.cz**

© 2017 Stanislav Hudec



Obrázek 7: Pozice místa odběru vzorků – černá tečka [16]



Obrázek 8: Vzorek č. 4



Obrázek 9: Vzorek č. 16



Obrázek 10: Vzorek č. 19

13.2 CHEMICKÉ LÁTKY

Pro kvalitativní kolorimetrické stanovení produktů ASR na jádrových vývrtech byl použit vodný roztok rhodaminu B a hexanitrokobaltitanu sodného.

13.2.1 Hexanitrokobaltitan sodný

Chemický vzorec je $\text{Na}_3\text{Co}(\text{NO}_2)_6$. Jedná se o žlutohnědý prášek se slabým zápachem po kyselině dusičné. Tato látka není hořlavá. Rozpustnost ve vodě je při 20 °C 720 g/l. Při manipulaci je třeba dodržovat určitá bezpečnostní pravidla, neboť jde o látku toxickou, u které je podezření na karcinogenní účinky. Při styku s kůží vyvolá podráždění, proto je nezbytné pracovat v ochranných brýlích a rukavicích.

13.2.2 Rhodamin B

Chemický vzorec pro rhodamin B je $\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{N}_2\text{O}_3\text{Cl}$. Je to zelený prášek bez zápachu. Rozpustnost ve vodě při 20 °C je 34 g/l. Způsobuje vážné poškození očí, používání ochranných brýlí je proto nutností.

14 METODIKA ZKOUŠENÍ

Ověření ASR proběhlo na jádrových vývrtech odebraných z různých úseků dálnic v ČR. Nejprve byly na povrch vzorků aplikovány chemikálie pro stanovení přítomnosti produktů ASR. Poté byly vzorky podrobeny zkoumání na mikroskopu.

14.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Pro ověření přítomnosti produktů ASR byly vybrány čtyři jádrové vývrty. Každý vývrt byl po výšce rozdělen na čtyři části, aby bylo možné stanovit přítomnost ASR v různé vzdálenosti od pojezdného povrchu konstrukce. Pro kolorimetrické zkoušky je vhodnější zkoušet nově vzniklé lomové plochy, než plochy vzniklé řezáním. Aby lomová plocha vznikla v požadovaném místě jádrového vývrtu, bylo nejdříve nutné místa lomu vyznačit a následně po obvodě proříznout do hloubky zhruba 1 cm. Takto připravený vzorek byl pomocí hydraulického lisu v určených místech rozlomen. Odlomené části vývrtů, které se

nacházeli nejbližší k pojižděnému povrchu, byly dále řezáním rozděleny na poloviny, které byly dále použity pro kolorimetrické zkušiny za použití připravených roztoků.



Obrázek 11: Rozdělení jádrového vývrtu na 4 části



Obrázek 12: Nově vytvořená lomová plocha

14.2 PŘÍPRAVA ROZTOKŮ

Použité chemikálie byly dodány v krystalické formě. Pro kolorimetrické zkoušky bylo třeba připravit 50 ml nasyceného vodného roztoku od každé chemické látky. Při přípravě roztoků byla použita deionizovaná voda.

Nasycený vodný roztok hexanitrokobaltitanu sodného byl připraven z 25 g této látky, jejíž rozpustnost ve vodě je 720 g/l, a z 34,7 ml vody.

Rozpustnost rhodaminu B ve vodě je pouze 34 g/l. Proto pro přípravu 50 ml nasyceného roztoku stačilo pouze 1,7 g rhodaminu B.

14.3 POSTUPY ZKOUŠEK

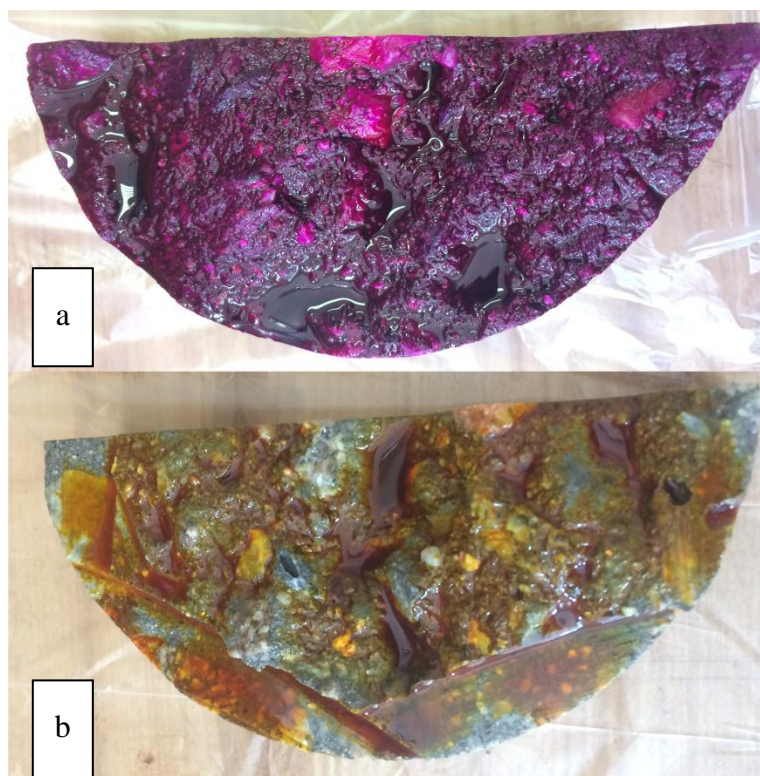
14.3.1 Kolorimetrické zkoušky

Pro kolorimetrické zkoušky byly použity lomové plochy v hloubce zhruba 40 mm od pojižděného povrchu. Přesné hodnoty vzdáleností od pojižděného povrchu, ve kterých se nachází zkoumané lomové plochy, jsou uvedeny v tabulce.

Tabulka 11: Vzdálenosti lomových ploch od pojižděného povrchu

označení vývrtu	vzdálenost od povrchu			ø h [mm]
	h ₁ [mm]	h ₂ [mm]	h ₃ [mm]	
JV 4	48,30	39,56	39,42	42,43
JV 16	37,94	28,96	40,11	35,67
JV19	66,04	60,21	52,13	59,46

Zkoušenou plochu bylo nutné nejdříve opláchnout proudem čisté vody, aby došlo k odstranění prachu a k navlhčení povrchu. Poté byl na povrch pomocí injekční stříkačky aplikován připravený roztok, který se nechal po dobu 60 s působit na povrch betonu. Poté se zkoumaný povrch důkladně opláchl čistou vodou. Tento postup je stejný pro oba použité roztoky. V případě přítomnosti produktů ASR dojde při použití hexanitrokobaltitanu sodného ke vzniku žluté sraženiny, při použití rhodaminu B se místa s obsahem alkalicko - křemičitých gelů bohatých na vápník zbarví růžově. Růžově se však mohou zbarvit i některé vápenaté složky hydratovaného cementu.



Obrázek 13: Zkoumaný povrch po aplikaci barvicích roztoků; a) rhodamin B; b) hexanitrokobaltitan sodný

14.3.2 Mikroskopický důkaz ASR

Nově vytvořené lomové plochy byly podrobeny mikroskopickému zkoumání. Pro pozorování byl použit optický mikroskop Nikon se zvětšením 65. V případě, že by se našli produkty ASR, budou v další fázi vzorky pozorovány rastrovacím elektronovým mikroskopem na pracovišti AdMaS. Mikroskopickým zkoumáním lze identifikovat projevy ASR a její produkty. Pomocí mikroskopu lze pozorovat trhliny procházející zrny kameniva a cementovým pojivem, které jsou vyplněné křemičitým gelem. Gel také může částečně nebo úplně vyplňovat póry. [10]

15 VÝSLEDKY

V následující části budou uvedeny výsledky prováděných zkoušek.

15.1 KOLORIMETRICKÉ ZKOUŠKY

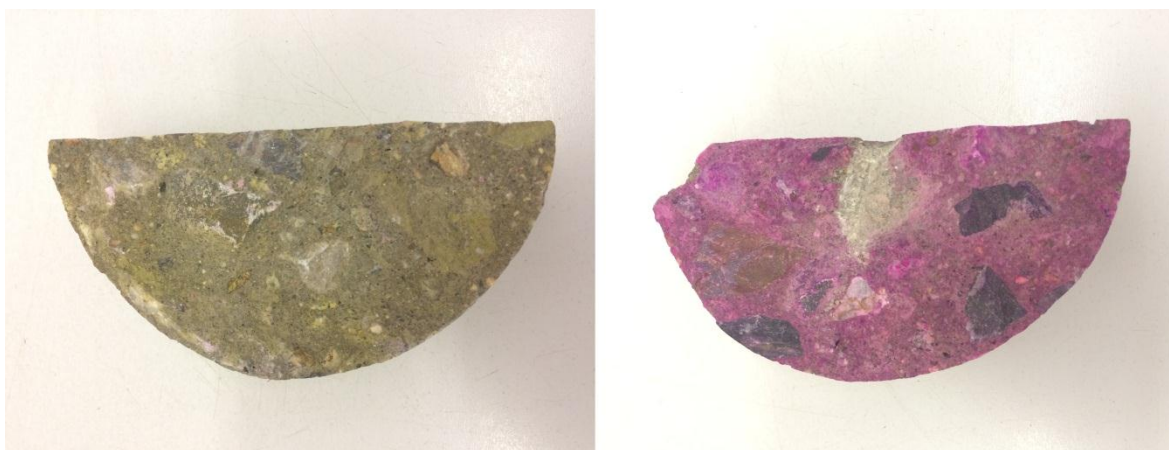
Při použití vodného roztoku henaitrokobaltitanu sodného dojde v případě přítomnosti produktů ASR ke vzniku žluté sraženiny. Na lomových plochách všech sledovaných vývrtů zůstalo po aplikaci roztoku a jeho následném omytí žluté zbarvení, které se však nachází pouze v určitých částech lomové plochy, zejména v cementové matici, zrna kameniva zůstala ve všech případech zcela bez žlutého zbarvení.

V případě použití roztoku rhodaminu B byla situace stejná jako v případě použití hexanitrokobaltitanu. Na všech pozorovaných lomových plochách došlo v určitých místech k růžovému zbarvení, některá místa měla stejnou barvu jako před aplikací barvicích roztoků.

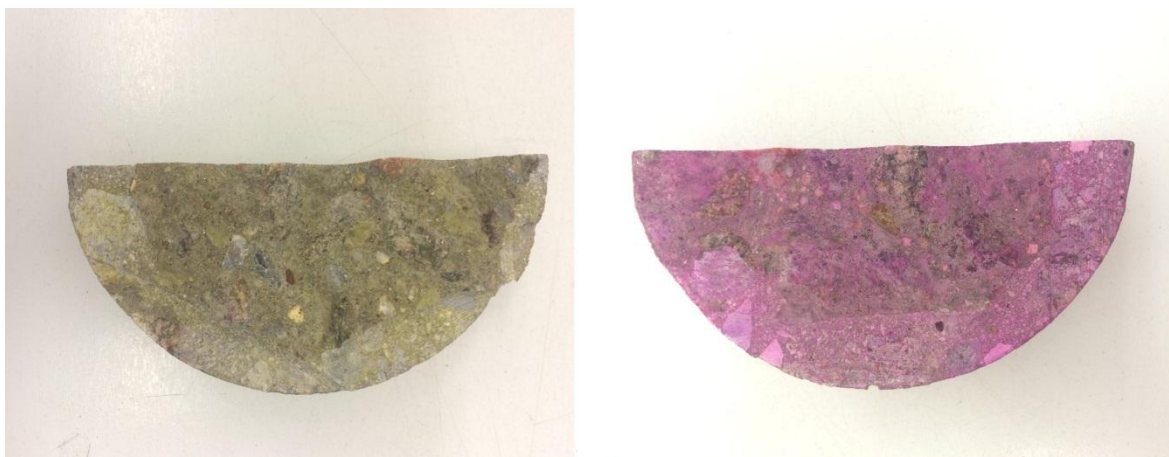
Při použití rhodaminu B byla růžově zbarvená plocha větší, než v případě použití hexanitrokobaltitanu.

Pro jednoznačné určení, jedná-li se o ASR, je třeba kolorimetrické zkoušky doplnit ještě mikroskopickým průzkumem.

Obrázek 14, 15, 16 ukazují lomové plochy po aplikaci barvicích roztoků.



Obrázek 14: vzorek č. 4; vpravo aplikován hexanitrokobaltitan sodný; vlevo aplikován rhodamin B



Obrázek 15: vzorek č. 16; vpravo aplikován hexanitrokobaltitan sodný; vlevo aplikován rhodamin B



Obrázek 16: vzorek č. 19; vpravo aplikován hexanitrokobaltitan sodný; vlevo aplikován rhodamin B

15.2 MIKROSKOPICKÝ DŮKAZ ASR

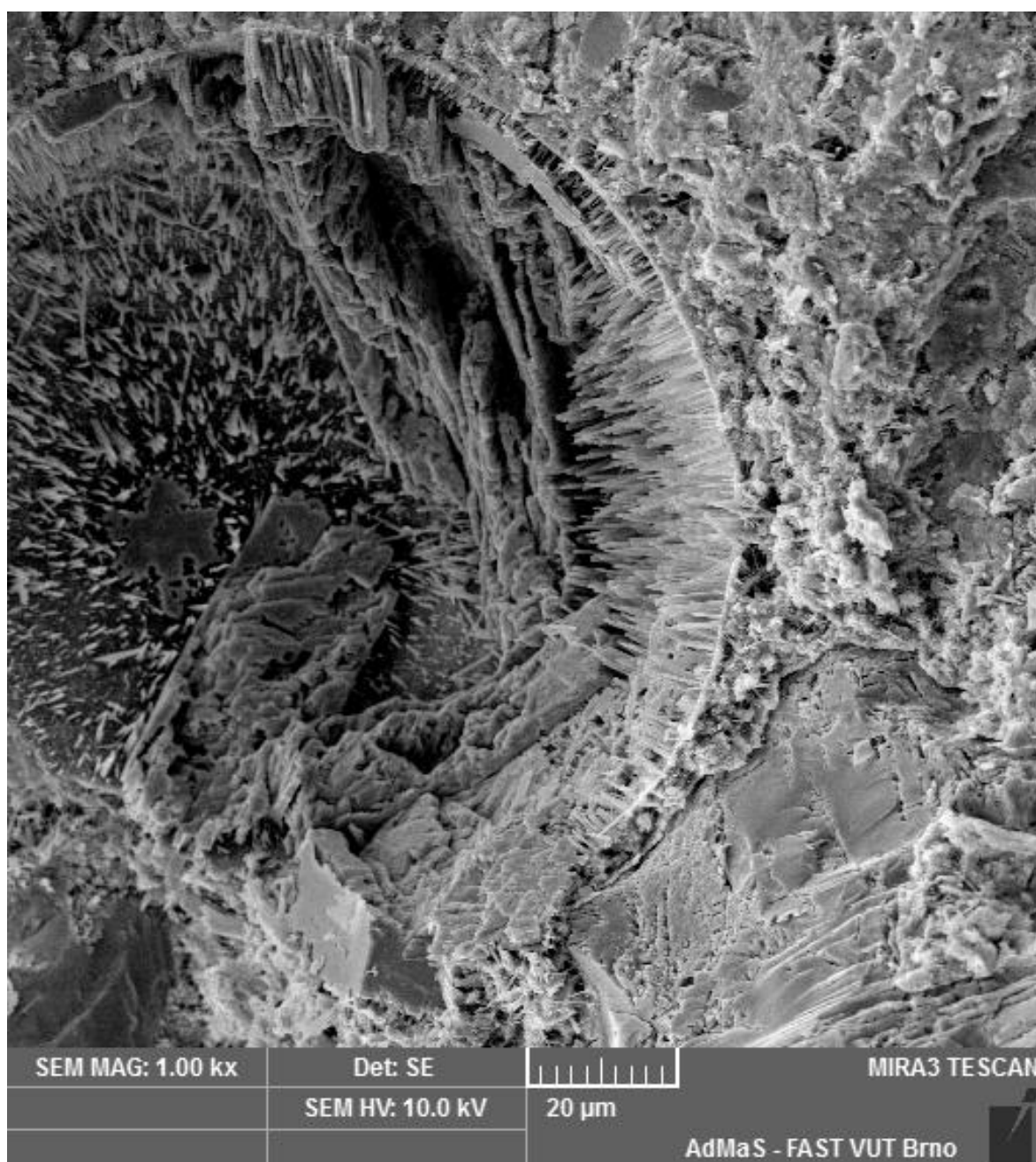
Všechny části vývrtů byly podrobeny mikroskopickému zkoumání. Nejprve byl pro zjištění přítomnosti produktů ASR použit optický mikroskop.

U vzorků č. 4 a č. 19 nebyly na zkoumané ploše patrné žádné známky po ASR. Nebyly objeveny trhliny v cementové matici ani v zrnech kameniva. Póry neobsahovaly alkalicko – křemičité gely. Pouze u vzorku č. 16 byl nalezen náznak ASR, avšak při daném zvětšení optického mikroskopu nebylo možné jednoznačně určit, zda se jedná o alkalicko – křemičitý gel, který by byl produktem škodlivé ASR. Proto byl vzorek č. 16 převezen do

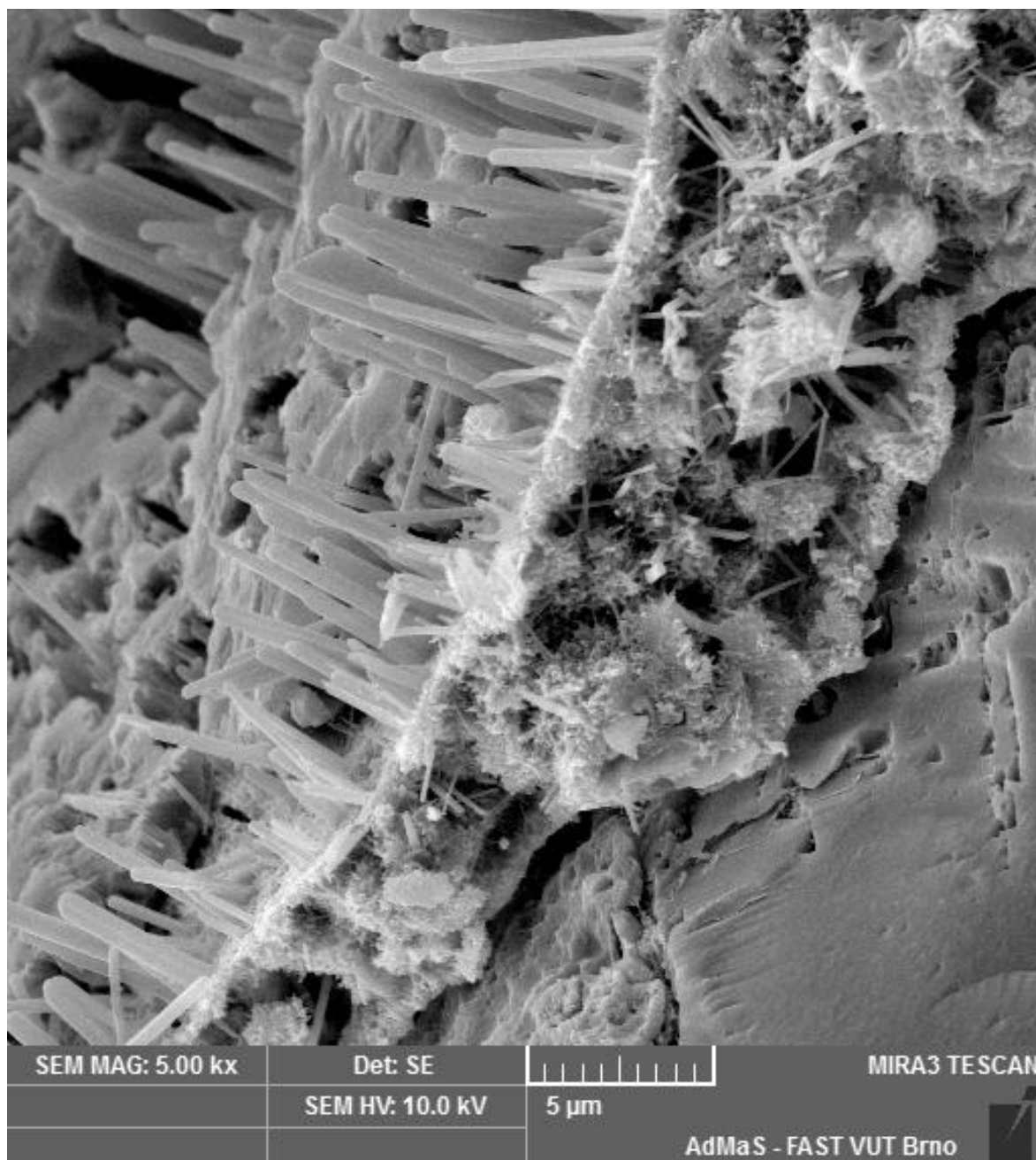
centra AdMaS, kde se pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu MIRA3 TESCAN daný vzorek zkoumal při zvětšení 1000x a 5000x.

Na fotografiích vzorku č. 16 pořízených z rastrovacího elektronového mikroskopu je patrný náznak ASR. Zejména v tranzitní zóně v okolí póru po kamenivu je možno pozorovat přítomnost gelu, jak je vidět na obrázku 14 a 15.

Výsledky pozorování na rastrovacím elektronovém mikroskopu korespondují s výsledky dosaženými pomocí optického mikroskopu. Náznak ASR byl u vzorku č. 16 potvrzen.



*Obrázek 17: Mikrofotografie vzorku č. 16; tranzitní zóna v okolí póru po kamenivu;
zvětšeno 1000x*



*Obrázek 18: Mikrofotografie vzorku č. 16; tranzitní zóna v okolí póru po kamenivu;
zvětšeno 5000x*

16 ZÁVĚR

V této práci byly shrnuty poznatky týkající se ASR, která svým působením ohrožuje betonové konstrukce, zejména ty, u kterých je možný přísun vlhkosti, jenž je jednou z podmínek vzniku ASR. Takovými konstrukcemi jsou například CB kryty vozovek.

Poruchy CB krytu, jenž má za následek ASR, lze od jiných degradačních procesů odlišit pomocí makroskopických i mikroskopických metod. Byly vybrány metody, které mohou sloužit pro levné a rychlé diagnostikování ASR ve stávajících konstrukcích. Jedná se o kolorimetrické zkoušky a mikroskopické určení produktů ASR.

Na vzorcích betonu odebraných z různých úseků dálnice D1 bylo těmito metodami ověřeno, zda ASR probíhá či nikoli. Zkoušky byly provedeny na třech jádrových vývrtech. Vzorek č. 4 byl odebrán v úseku Jihlava – Větrný Jeníkov na kilometru 115 ve směru na Prahu. Vzorek č. 16 pochází z úseku Velká Bíteš – Ostrovačice, kilometr 175 ve směru na Brno. Poslední vzorek č. 19 je z úseků Kývalka – Brno, kilometr 186.

Na vzorcích jádrových vývrtů byly v první fázi provedeny kolorimetrické zkoušky za použití nasycených vodných roztoků rhodaminu B a hexanitrokobaltitanu sodného. Po provedení těchto zkoušek bylo zjištěno, že tu je možnost přítomnosti produktů ASR, protože na všech zkoumaných lomových plochách došlo po aplikaci barvicích roztoků v určité míře k zabarvení povrchu. Aby bylo možné s určitostí rozhodnout, zda se skutečně jedná o ASR, byly vzorky podrobeny mikroskopickému zkoumání. Z mikroskopického pozorování však vyplynulo, že se ani v jednom ze tří případů o ASR nejedná. Pouze u vzorku č. 16 byl objeven náznak přítomnosti alkalicko – křemičitého gelu, který byl patrný až při sledování pomocí rastrovacího elektronového mikroskopu.

Pro výrobu CB krytu v pozorovaných úsecích D1 bylo použito kamenivo, které je z hlediska ASR vyhovující.

I po více než 25 letech se neobjevují známky ASR, které by byly příčinou rozpadu CB krytů na dálnici D1, jak je ASR mnohdy přisuzováno. Vzhledem k dosaženým výsledkům můžeme tedy narušení povrchu CB krytů a vznik trhlin vlivem ASR na sledovaných úsecích vyloučit. K porušení došlo zřejmě působením mrazu a přetížením vozovek.

17 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] RAJABIPOUR, Farshad, Eric GIANNINI, Cyrille DUNANT, Jason IDEKER a Michael THOMAS. *Cement and Concrete Research: Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps* [online]. 2015, , 130-146 [cit. 2017-05-17]. DOI: 0008-8846.
- [2] LINDGÅRD, Jan, Özge ANDIÇ-ÇAKIR, Isabel FERNANDES, Terje F. RØNNING a Michael D.A. THOMAS. Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing. *Cement and Concrete Research* [online]. 2012, **42**(2), 223-243 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.10.004. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884611002687>
- [3] ED. BY R.N. SWAMY. *The Alkali-silica reaction in concrete* [online]. [Online-Ausg.]. Glasgow: Blackie [u.a.], 1992 [cit. 2017-05-19]. ISBN 02-030-3663-8. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=p8--3BiBbYMC&oi=fnd&pg=PP1&dq=historical+background+of+alkali+silica+reaction&ots=TENSgUSrIj&sig=84CWOhp2vckaHE0XVaSBepmRxgA&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- [4] BAJZA, Adolf. *Alkalicko - kremičitá reakcia kameniva v betóne: Vplyv reakcií kameniva s alkáliami na degradáciu betónu* [CD]. Bratislava: Slovenská asociácia výrobcov transportbetonu, 2009 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: www.savt.sk
- [5] THOMAS, M. D. A. *Alkali-silica reactivity field identification handbook* [online]. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, 2011 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/asr/pubs/hif12022.pdf>

- [6] DOBIÁŠ, Daniel. Alkalická reakce kameniva v betonu TP 137 MD. In: *Seminář: ČSN EN 206 a další nové standardy pro výrobu a zkoušení betonu* [online]. s. 7 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.betonuniversity.cz/stahnout-soubor?id=1527>
- [7] MODRÝ, S. *Vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací: Etapa a) Rešeršní průzkum alkalické reakce s vyhodnocením*. Kloknerův ústav ČVUT, 2003.
- [8] BUCKLEY, A. M. a M. GREENBLATT. The Sol-Gel Preparation of Silica Gels. *Journal of Chemical Education* [online]. 1994, **71**(7), 599- [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1021/ed071p599. ISSN 0021-9584. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed071p599>
- [9] GABORIAUD, Fabien, André NONAT, Denis CHAUMONT a Aldo CRAIEVICH. Aggregation and Gel Formation in Basic Silico-Calco-Alkaline Solutions Studied: A SAXS, SANS, and ELS Study. *The Journal of Physical Chemistry B* [online]. 1999, **103**(28), 5775-5781 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1021/jp990151s. ISSN 1520-6106. Dostupné z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jp990151s>
- [10] JUENGER, M.C.G a C.P OSTERTAG. Alkali-silica reactivity of large silica fume-derived particles. *Cement and Concrete Research* [online]. 2004, **34**(8), 1389-1402 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.01.001. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884604000110>
- [11] BURDOVÁ, Anna. *Porovnání makro - a mikroskopických projevů alkalicko-křemičité reakce v cementobetonovém krytu vozovek*. Praha, 2010. Diplomová práce. Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů. Vedoucí práce Doc. Mgr. Richard Přikryl, Dr.

- [12] Petrographic Methods of Examining Hardened Concrete: A Petrographic Manual: Chapter 8. Examination With The Stereomicroscope. *Federal Highway Administration Research and Technology* [online]. 2006 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/04150/chapt8.cfm>
- [13] ACR Concrete Controversy Continues – Investigation Indicates that ASR is to Blame. *RJ Lee Group* [online]. 2013 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://www.rjlg.com/2013/12/acr-concrete-controversy-continues-investigation-indicates-that-asr-is-to-blame/>
- [14] SHAFATIAN, Seyed M.H., Alireza AKHAVAN, Hamed MARAGHECHI a Farshad RAJABIPOUR. How does fly ash mitigate alkali-silica reaction (ASR) in accelerated mortar bar test (ASTM C1567)? *Cement and Concrete Composites* [online]. 2013, **37**, 143-153 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2012.11.004. ISSN 09589465. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946512002223>
- [15] DOVÁL, Martin. *Alkalicko - kremičitá reakcia kameniva v betóne: Skúsenosti s ASR v Nemecku, nové urychlené metódy stanovenia kameniva citlivého na prítomnosť alkálií* [CD]. Bratislava: Slovenská asociácia výrobcov transportbetónu, 2009 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: www.savt.sk
- [16] Pozemní komunikace-navrhování a stavba. *Stavební inženýrství* [online]. Ostrava: FAST VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2013 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: http://www.stavebniinzenyrstvi.cz/wp-content/uploads/2014/09/PK_navrhovani_-a_-stavba.pdf
- [17] Rozdíly mezi CB a AB. *České dálnice* [online]. [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <http://www.ceskedalnice.cz/odborne-info/rozdily-mezi-cb-a-ab/>
- [18] STRYK, Josef a Karel POSPÍŠIL. Vozovky s cementobetonovým krytem. *ASB - portal.cz: inženýrské stavby* [online]. 2012 [cit. 2017-05-18].

Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/doprava/vozovky-s-cementobetonovym-krytem>

- [19] MINISTERSTVO DOPRAVY. *Technické podmínky 137: Vyloučení alkalické reakce kameniva v betonu na stavbách pozemních komunikací*. 3. Praha: Ministerstvo dopravy, 2013, 52 s.
- [20] SCHERER, George W. Structure and properties of gels. *Cement and Concrete Research* [online]. 1999, **29**(8), 1149-1157 [cit. 2017-05-19]. DOI: 10.1016/S0008-8846(99)00003-4. ISSN 00088846. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0008884699000034>

18 SEZNAM PŘÍLOH

18.1 SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Pravděpodobnost výskytu ASR na základě přítomnosti jejích projevů [5]</i>	<i>13</i>
<i>Tabulka 2: Rozpustnost SiO₂ ve vodě [1]</i>	<i>17</i>
<i>Tabulka 3: Některé reaktivní přírodní materiály [3]</i>	<i>20</i>
<i>Tabulka 5: Výsledky zkoušek podle metody LMPA (L) a DAfStb (D) [15]</i>	<i>29</i>
<i>Tabulka 6: Členění cementobetonových krytů [16]</i>	<i>31</i>
<i>Tabulka 7: Srovnání celkových nákladů na úsecích vozovek s CB a asfaltovým krytem na dálnici D1 [18]</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 8: Informativní tabulka reaktivnosti hornin [19]</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 9: Definice stupňů vlhkosti prostředí pro ztvrdlý beton [19]</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 10: Základní informace o odebraných vzorcích</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 11: Lokality použitých kameniv</i>	<i>38</i>
<i>Tabulka 12: Vzdálenosti lomových ploch od poježděného povrchu</i>	<i>42</i>

18.2 SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Závěrečné stadium rozpadu CB krytu dálnice D11 – rok 1998; trhliny typického tvaru vzniklé vlivem ASR [6]</i>	<i>12</i>
<i>Obrázek 2: Posloupnost vzniku ASR[4]</i>	<i>15</i>
<i>Obrázek 3: (a) krystalický oxid křemičitý složený ze stejně velkých jednotek, všechny kyslíky mají Si; (b) amorfní SiO₂; nestejněměrné jednotky s alkáliemi a vápníkem; (c) ASR gel tvořený shluky koloidních částic SiO₂ je obklopen pórovým roztokem, struktura SiO₂ velmi degradovaná se spoustou volných atomů kyslíku [8]</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 4: (A) Vzorek s roztokem uranylacetátu - běžné světlo; (B) Vzorek s roztokem uranylacetátu – UV světlo [12]</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 5: Mikrofotografie leštěného vzorku betonu s trhlinami v kamenivu; trhliny jsou vyplněny gelem ASR [13]</i>	<i>24</i>

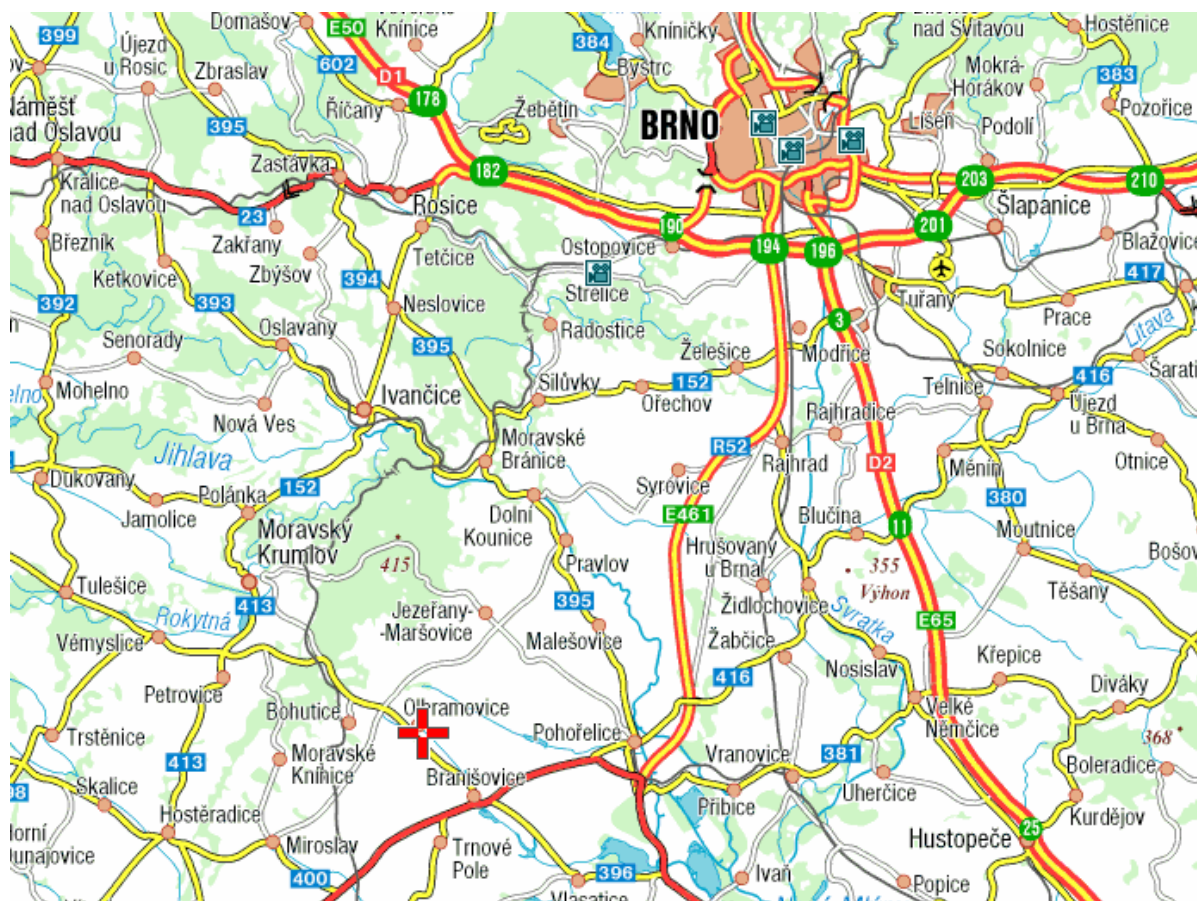
<i>Obrázek 6: Schůdky na spárách na D1 (u Rousínova) – rok 1988 [17]</i>	33
<i>Obrázek 7: Pozice místa odběru vzorků – černá tečka [16]</i>	38
<i>Obrázek 8: Vzorek č. 4</i>	39
<i>Obrázek 9: Vzorek č. 16</i>	39
<i>Obrázek 10: Vzorek č. 19</i>	39
<i>Obrázek 11: Rozdělení jádrového vývrtu na 4 části</i>	41
<i>Obrázek 12: Nově vytvořená lomová plocha</i>	41
<i>Obrázek 13: Zkoumaný povrch po aplikaci barvicích roztoků; a) rhodamin B; b) hexanitrokobaltitan sodný</i>	43
<i>Obrázek 14: vzorek č. 4; vpravo aplikován hexanitrokobaltitan sodný; vlevo aplikován rhodamin B</i>	44
<i>Obrázek 15: vzorek č. 16; vpravo aplikován hexanitrokobaltitan sodný; vlevo aplikován rhodamin B</i>	45
<i>Obrázek 16: vzorek č. 19; vpravo aplikován hexanitrokobaltitan sodný; vlevo aplikován rhodamin B</i>	45
<i>Obrázek 17: Mikrofotografie vzorku č. 16; tranzitní zóna v okolí póru po kamenivu; zvětšeno 1000x</i>	47
<i>Obrázek 18: Mikrofotografie vzorku č. 16; tranzitní zóna v okolí póru po kamenivu; zvětšeno 5000x</i>	48

18.3 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ASR	alkalicko – křemičitá reakce
SEM	rastrovací elektronový mikroskop (scanning electron microscope)
OH^-	hydroxylový aniont
Na_2O	oxid sodný
K_2O	oxid draselný
SiO_2	oxid křemičitý
$\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$	siloxanová vazba
$\text{Si}(\text{OH})_4$	hydroxid křemičitý
Ca^{2+}	vápenatý kationt
Na^+	sodný kationt
K^+	draselný kationt
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	hydroxid vápenatý
$[\text{UO}_2(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_2]$	uranylacetát
$(\text{C}_{28}\text{H}_{31}\text{N}_2\text{O}_3\text{Cl})$	rhodamin B
$\text{Na}_3\text{Co}(\text{NO}_2)_6$	hexanitrokobaltitan sodný
NaOH	hydroxid sodný
CaO	oxid vápenatý
LiNO_3	dusičnan lithný

Příloha č. 1 – Katalog lomů a pískoven ČR

PROVOZOVNA
OLBRAMOVICE
KRAJ: JIHOMORAVSKÝ



Vlastník	Českomoravské Štěrkovny a.s. Příkop 15/17 656 13 Brno IČO: 63475511 cmsterk@cmsterk.cz	tel.: 545114111 fax: 545114210 www.cmsterk.cz
Kontakt na lom	Kamenolom Olbramovice 671 75 Loděnice u Mor.Krumlova cmsterk@cmsterk.cz	tel.: 515322611 fax: 515322559
Místopis lomu	okres Znojmo 45 km jihozápadně od Brna	

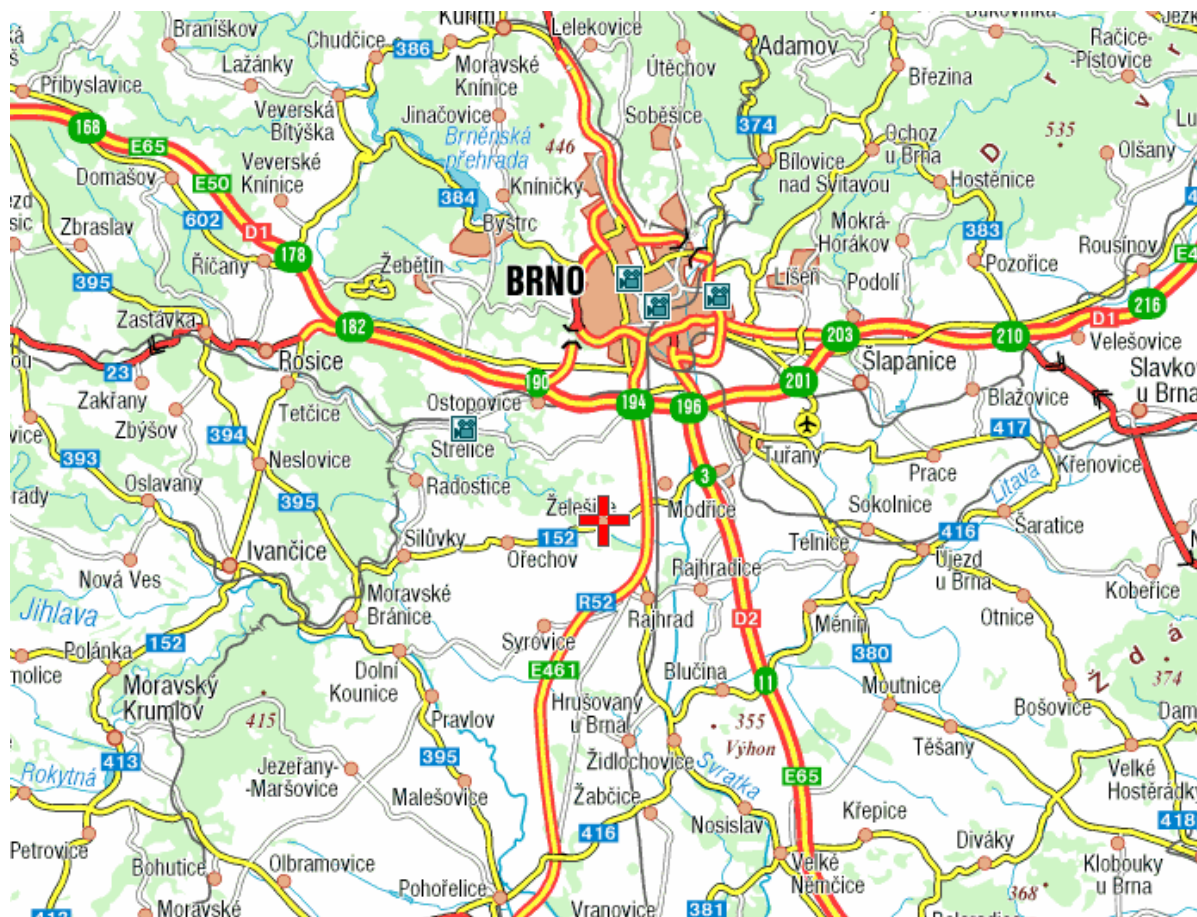
Dopravní připojení	automobilová vlečka: ano železniční doprava: ano vlastní doprava: ano lodní doprava: ne
Roční max.současná kapacita	tun: 320 000
Životnost zásobám a max.současné kapacity vzhledem k	roků: 40 (po vyřešení vztahů s ochránci přírody 90 let)
Druh horniny	granodiorit
Základní charakteristické vlastnosti horniny	objemová hmotnost [kg/m ³] 2630 otlukovost LA na 8-16 [-] 20,6 tvarový index nad 3 na 8-16 [% hm.] 19,3 ohladitelnost (součinitel) [-] PSV ₅₃ mrazuvzdornost 8-16 [% hm.] 0,2 obsah chloridů [% hm.] 0,0006 odplavitelné částice jen 0-4 [% hm.] 0,5 alkalicko křemičitá reakce [-] vyhovuje
Technologické vybavení lomu	odhlinění ne počet stupňů drcení 4 úprava praním ano řízené míchání širokých frakcí ne mechanicky zpevněné kamenivo - MZK ano

Vyráběné frakce	DDK 0-4 HDK 4-8 8-11 8-16 11-16 11-22 16-32 32-63 ŠK 0-32 0-63 0-90
Důvody nezískání výrobních certifikátů	-
Certifikace výrobku	Provozovna má výrobní certifikaci pro betony i asfaltobetony.
Stavební užití	betony, CB kryty vozovek, ložní a obrusné vrstvy vozovek, asfaltové směsi, nestmelené vrstvy, MZK, vtlačované a prolévané vrstvy, železniční svršek i spodek, lomový kámen,
Komentář	Vlastnictví pozemku: cca.45% Českomoravské Štěrkovny a.s., 30% Lesy ČR, 25% obec Loděnice u Mor.Krumlova. Perspektivní lom s velkými zásobami, které jsou však z větší části vázány negativním stanoviskem ochránců přírody. Kvalitativně kamenivo vyhovuje pro všechny druhy stavební činnosti. Kapacita lomu není z důvodu odbytových možností využívána.

PROVOZOVNA

ŽELEŠICE

KRAJ: JIHOMORAVSKÝ



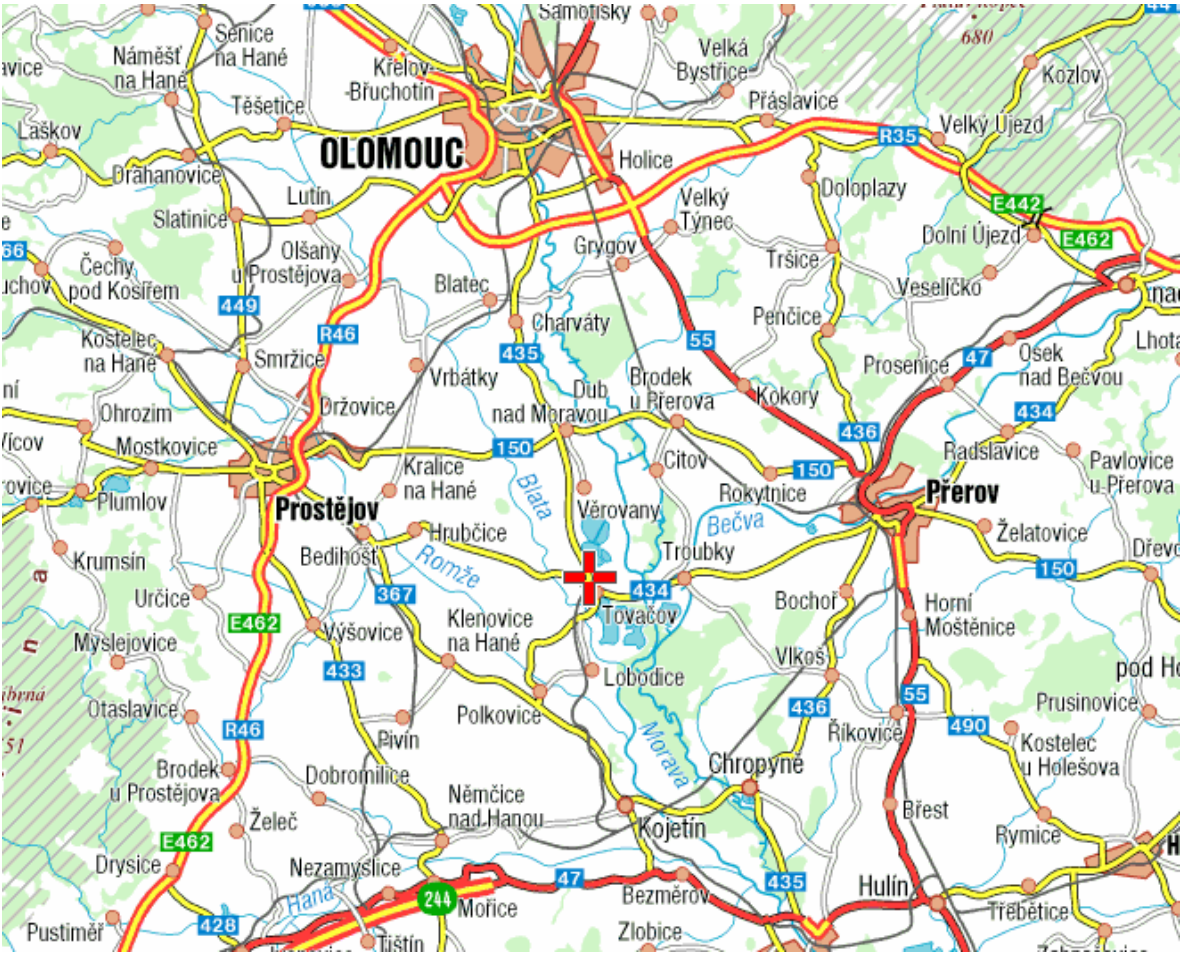
Vlastník	LOMY, spol. s r. o.	
	Vídeňská 127	tel.: 547212160 -161
Kontakt na lom	391 81 Veselí nad Lužnicí	fax: 547213496
	IČO: 46979361	
Místopis lomu	lomy@lomy.cz	www.lomy.cz
	Kamenolom Želešice	tel.: 547424641
	664 43 Želešice	fax: 547424647
	lomy@lomy.cz	
	okres Brno-venkov	
	12 km jižně od Brna	

Dopravní připojení	automobilová vlečka: ano železniční doprava: ne vlastní doprava: ano lodní doprava: ne
Roční kapacita max.současná	tun: 800 000
Životnost vzhledem k zásobám a max.současné kapacitě	roků: 30
Druh horniny	amfibolit
Základní charakteristické vlastnosti horniny	objemová hmotnost [kg/m ³] 2890 otlukovost LA na 8-16 [-] 24,1 tvarový index nad 3 na 8-16 [% hm.] 11 ohladitelnost (součinitel) [-] 0,51 mrazuvzdornost 8-16 [% hm.] - obsah chloridů [% hm.] - odplavitelné částice jen 0-4 [% hm.] - alkalicko křemičitá reakce [-] vyhovuje
Technologické vybavení lomu	odhlinění ano počet stupňů drcení 4 úprava praním ano řízené míchání širokých frakcí ano mechanicky zpevněné kamenivo - MZK ne
Vyráběné frakce	DDK 0-2 0-4 2-4 HDK 4-8 8-11 8-16 11-16 11-22 16-22 16-32 32-63 ŠK 0-32 0-63
Důvody nezískání výrobních certifikátů	-
Certifikace výrobku	Provozovna má výrobní certifikaci pro betony i asfaltobetony. Jakost dle: ČSN EN ISO 9001:2001
Stavební užití	betony, podkladní vrstvy vozovek, asfaltové směsi, lomový kámen,

PROVOZOVNA

TOVAČOV

KRAJ: OLOMOUCKÝ



Vlastník	Českomoravské Štěrkovny a.s. Příkop 15/17 656 13 Brno IČO: 63475511 cmsterk@cmsterk.cz	tel.: 545114111 fax: 545114210 www.cmsterk.cz
Kontakt na lom	Pískovna Tovačov 751 01 Tovačov cmsterk@cmsterk.cz	tel.: 581705230 fax: 581731414
Místopis lomu	okres Přerov 22 km jižně od Olomouce	

Dopravní připojení	automobilová vlečka: ano železniční doprava: ano vlastní doprava: ano lodní doprava: ne
Roční max.současná kapacita	tun: 400 000
Životnost vzhledem k zásobám a max.současné kapacitě	roků: 22
Druh horniny	štěrkopísek
Základní charakteristické vlastnosti horniny	objemová hmotnost [kg/m ³] 2600 otlukovost LA na 8-16 [-] 39 tvarový index nad 3 na 8-16 [% hm.] 14 ohladitelnost [-] - mrazuvzdornost [% hm.] 1,0 obsah chloridů [% hm.] 0,0004 odplavitelné částice jen 0-4 [% hm.] 0,7 alkalicko křemičitá reakce [-] -
Technologické vybavení lomu	odhlinění ano počet stupňů drcení 1 úprava praním ano řízené míchání širokých frakcí ne mechanicky zpevněné kamenivo - MZK ne
Vyráběné frakce	DTK 0-2 0-4 HTK 4-8 8-16 ŠK 0-22
Důvody nezískání výrobních certifikátů	-
Certifikace výrobku	Provozovna má výrobní certifikaci pro betony i asfaltobetony.
Stavební užití	asfaltové směsi, betonové směsi, CB kryty vozovek, maltové směsi, nestmelené vrstvy,

PROVOZOVNA

RANČÍŘOV

KRAJ: VYSOČINA



Vlastník	COLAS CZ a.s. závod LOMY Kolbenova 259 198 21 Praha 9 IČO: 26177005 reditel@lomy.colas.cz
Kontakt na lom	lom Rančířov 586 37 Jihlava, Kosovská 10
Místopis lomu	okres Jihlava 10 km jižně od Jihlavy

Dopravní připojení	automobilová vlečka: ano železniční doprava: ne vlastní doprava: ano lodní doprava: ne
Roční max.současná kapacita	tun: 300 000
Životnost vzhledem k zásobám a max.současné kapacitě	roků: dostatečná
Druh horniny	biotitická-silimanická rula s vložkami aplitu
Základní charakteristické vlastnosti horniny	objemová hmotnost [kg/m ³] 2660 otlukovost LA na 8-16 [-] 24 tvarový index nad 3 na 8-16 [% hm.] 8,0 ohladitelnost (součinitel) [-] PSV ₅₉ mrazuvzdornost 8-16 [% hm.] 0,8 obsah chloridů [% hm.] 0,0004 odplavitelné částice jen 0-4 [% hm.] 7,0 alkalicko křemičitá reakce [-] vyhovuje
Technologické vybavení lomu	odhlinění ano počet stupňů drcení 3 úprava praním ne řízené míchání širokých frakcí ne mechanicky zpevněné kamenivo - MZK ne
Vyráběné frakce	DDK 0-4 HDK 4-8 8-11 8-16 11-22 16-32 32-63 ŠK 0-8 0-11 0-22 0-32 0-63 0-90 0-125
Důvody nezískání výrobních certifikátů	-
Certifikace výrobku	Provozovna má výrobní certifikaci pro betony i asfaltbetony.
Stavební užití	podkladní vrstvy vozovek, asfaltové směsi, nátěry, lomový kámen, betonové konstrukce, vodostavební betony